
B
Al
C
Ti
М.И.БЛУДОВ
БЕСЕДЫ
ПО
ФИЗИКЕ

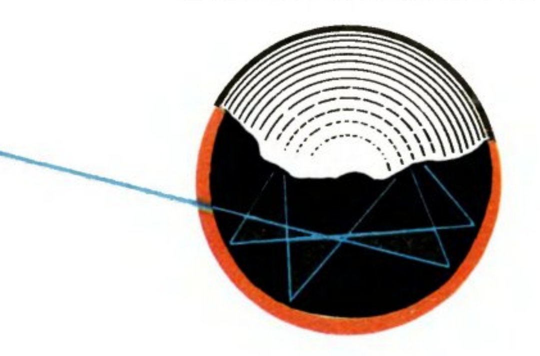
М. И. БЛУДОВ

БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ

Часть II

Учебное пособие
для учащихся

Рекомендовано
Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР



Издание третье, переработанное
и дополненное

Под редакцией
Л. В. ТАРАСОВА

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1985

ББК 22.3
Б70

Рецензенты:
учителя физики *А. Ю. ВОЛОХОВ, А. З. СИНЯКОВ*

Блудов М. И.
Б70 Беседы по физике. Ч. II. Учеб. пособие для учащихся/ Под ред. Л. В. Тарасова.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Просвещение, 1985.— 208 с., ил.

Во II части книги «Беседы по физике» в популярной форме рассказано об электрических и оптических явлениях и строении атома.

Б $\frac{4306020000-403}{103(03)-85}$ инф. письмо—85

ББК 22.3
53

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

К сожалению, мне не довелось лично познакомиться с автором книги «Беседы по физике» Михаилом Ивановичем Блудовым. Однако совсем нетрудно представить его себе как очень интересного человека, влюбленного в физику и прекрасно знающего ее. Об этом говорят три книги его замечательных «Бесед по физике». Они написаны с глубоким пониманием дела, с множеством интересных физических и технических примеров, занимательно и отличным языком. Отбор и характер этого материала соответствуют уровню развития и самому духу современной физики. Поэтому я был очень рад решению издательства «Просвещение» осуществить новое, третье издание «Бесед по физике» и с удовольствием принял предложение быть титульным редактором этой книги.

Со времени второго издания прошло около десяти лет. Естественно, что за это время техника сделала значительный шаг вперед, стремительно развивающиеся физические науки достигли новых успехов. Все это нельзя было не учитывать при подготовке к печати нового издания.

В настоящем издании сохранена прежняя структура книги, оставлены в неприкосновенности все авторские замечания и рассуждения «личного плана», его обращения к истории физики и техники. Вместе с тем пришлось обновить примеры, дать дополнительные разъяснения некоторых вопросов, трудных для школьников, улучшить и сделать красочным иллюстративный материал, а также пополнить книгу новой ин-

формацией, отражающей последние достижения науки и техники. В связи с этим в первую часть «Бесед по физике» был включен материал, посвященный успехам в космосе, достигнутым в последние годы. Во второй части мы сочли необходимым написать заново беседу о лазерах («Действительность, превосходящая фантазию»), отразив в ней современное понимание физики процессов, происходящих в лазерах. Кроме того, были написаны четыре новые беседы: о применениях лазеров в современном производстве («Лазеры обрабатывают материалы»), об оптической голографии («Можно ли заморозить световую волну?»), об открытии нейтрона как решающем этапе в развитии ядерной физики и техники («Как был открыт нейтрон»), о новейших достижениях в физике элементарных частиц («Краткая история физики элементарных частиц»). Хочется надеяться, что новые беседы органически войдут в ткань книги, полезным образом дополнят ее, сделав книгу более современной. Естественно, что мы стремились в максимальной степени сохранить в дополнительных беседах стиль автора и хотели бы рассматривать их как скромную дань светлой памяти прекрасного учителя и популяризатора физики.

Л. В. ТАРАСОВ

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ!

Вечер. Приятно отдохнуть после трудового дня. Вся семья дома. Мягкий свет матовой электрической лампы освещает стол, оставляя в тени обстановку комнаты.

Вдруг все погружается в темноту.

— Ну вот, этого еще недоставало! Короткое замыкание! Это, верно, Игорь со своими опытами! — раздаются восклицания сидящих за столом, и, когда из соседней комнаты с зажженной свечкой в руке появляется смущенный Игорь, все набрасываются на него с упреками.

— Вечно ты что-нибудь натворишь!

— Подумаешь! Сейчас поставлю новую пробку,— пытается отразить нападение Игорь и проходит в переднюю, где установлен предохранительный щиток. Несколько минут он возится с установкой лестницы, сменяет перегоревший предохранитель. В комнате снова вспыхивает свет, и, довольный, наш юный электротехник возвращается к себе в комнату к прерванным занятиям. «Все же надо будет поставить перед рабочим столом маленький распределительный щит»,— думает Игорь.

На рисунке 1 изображен щит, который необходимо смонтировать и вам, если вы пожелаете проделывать опыты с электрическим током от сети и не хотите подвергать себя и всю семью неприятностям, связанным с коротким замыканием.

Но что такое короткое замыкание?

Сила тока, возникающего при включении в сеть какого-нибудь прибора, зависит от двух причин: от напряжения в сети и сопротивления прибора: $I = \frac{U}{R}$. Это знаменитый закон Ома. Если напряжение в сети, в которую включается электрическая настольная лампа, 220 В, а сопротивление лампы 880 Ом, то из закона Ома легко определить силу тока. Она будет равна:

$$I = \frac{220\ \text{В}}{880\ \text{Ом}} = 0{,}25\ \text{А}.$$

Сопротивление подводящих проводов, по которому течет ток, мало́ и в расчет нами не принималось.

Если вместо лампы включается электрическая плитка сопротивление 88 Ом, то сила тока будет равна:

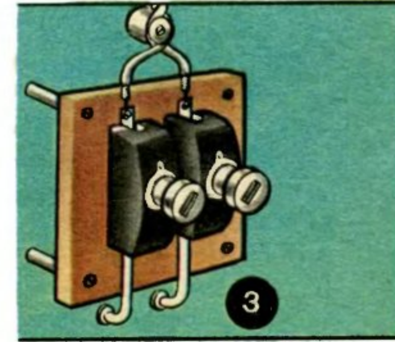
$$I = \frac{220\ \text{В}}{88\ \text{Ом}} = 2{,}5\ \text{А}.$$

Представьте, что вместо плитки вы включили в розетку моток изолированной проволоки площадью поперечного сечения 1 мм^2, общей длиной 60 м. Сопротивление такой проволоки приблизительно равно 1 Ом. Результат:

$$I = \frac{220\ \text{В}}{1\ \text{Ом}} = 220\ \text{А}.$$







Это очень большая сила тока; такой ток, конечно, сожжет предохранительные пробки, если не успеет натворить других бед. Несмотря на порядочную длину проволоки (60 м), мы можем в этом случае говорить о коротком замыкании, при котором вследствие малого сопротивления замыкающего электрическую цепь проводника сила тока очень возрастает. Короткое замыкание может не только испортить проводку, но и вызвать пожар. Вот почему необходимо следить за исправностью проводки и менять ее, если она становится ветхой. Ни в коем случае нельзя протыкать провода булавкой или перерезать их при монтажных работах ножницами в одном месте (рис. 2). В крайнем случае, когда необходимо отрезать часть проволоки, надо один из проводов, из которых свит шнур, перерезать в одном месте, а другой — на значительном расстоянии от него. Необходимо всегда соблюдать основное правило монтажа осветительной и силовой сети:

на время работы следует вывернуть предохранители на вводном щитке.

Во всякой электрической сети есть несколько предохраняющих приспособлений. Иногда первый предохранитель вмонтирован в розетку. Далее, при входе в квартиру устанавливается предохранительный щиток (рис. 3), а на столбе перед домом (если у вас воздушная проводка) или в подвальном помещении, куда вводится ток через подземный кабель, устанавливаются общие плавкие предохранители (рис. 4). Вам доступен главным образом только щиток, где на определенную группу ламп устанавливаются легкоплавкие предохранительные пробки, рассчитанные обычно на силу тока 6 А (номинальная сила тока). Допустима небольшая перегрузка сверх этой нормы, но только кратковременная.

Категорически запрещается устанавливать вместо перегоревших стандартных пробок самодельные, в которых перегоревшая легкоплавкая проволочка заменена жилкой из электрического шнура или, еще хуже, более толстой проволокой.

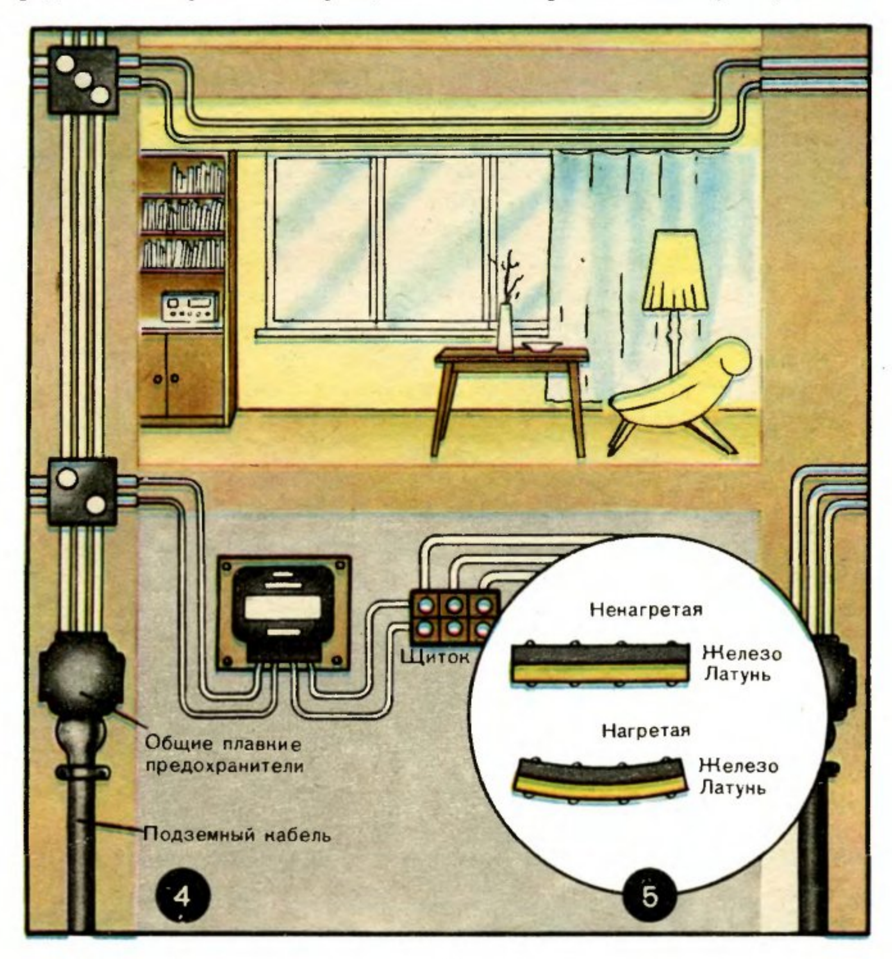
Такой «жучок» уже не является предохранителем, и, поставив себе такую самодельную пробку, вы больше не гарантированы от всех опасностей, связанных с коротким замыканием.

В настоящее время в магазинах электроприборов можно купить автоматические выключатели тока многократного использования. Основной элемент этих устройств — биметаллическая пластинка, составленная из двух наложенных друг на друга и скрепленных между собой металлических пластинок с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Обычно используют латунь и железо. При нагревании пластинка должна изогнуться в сторону железа (рис. 5). Это свойство используется в различных автоматических устройствах — тепловых реле, ограничителях тока, автоматических предохранителях на квартирном щитке. Стоит только пластинке нагреться и изогнуться при прохождении через предохранитель слишком большого тока, как цепь размыкается.

Ни в коем случае нельзя пренебрегать правилом техники безопасности: *все работы, связанные с монтажом и ремонтом электрической сети, производить при полном снятии напряжения.* Юным электротехникам не лишне будет узнать некоторые подробности, касающиеся опасности, которую может представлять электрический ток. Уже первые исследователи электричества испытали на себе неприятные ощущения, когда через их тело проходил электрический ток. Голландский профессор Мушенбрук в письме к Реомюру в 1746 г. так описывал опыты с лейденской банкой: «Хочу сообщить вам новый и странный опыт, который советую никак не повторять. Я делал некоторые исследования над электрической силой и для этой цели повесил на двух шнурах из голубого шелка железный ствол, получавший,

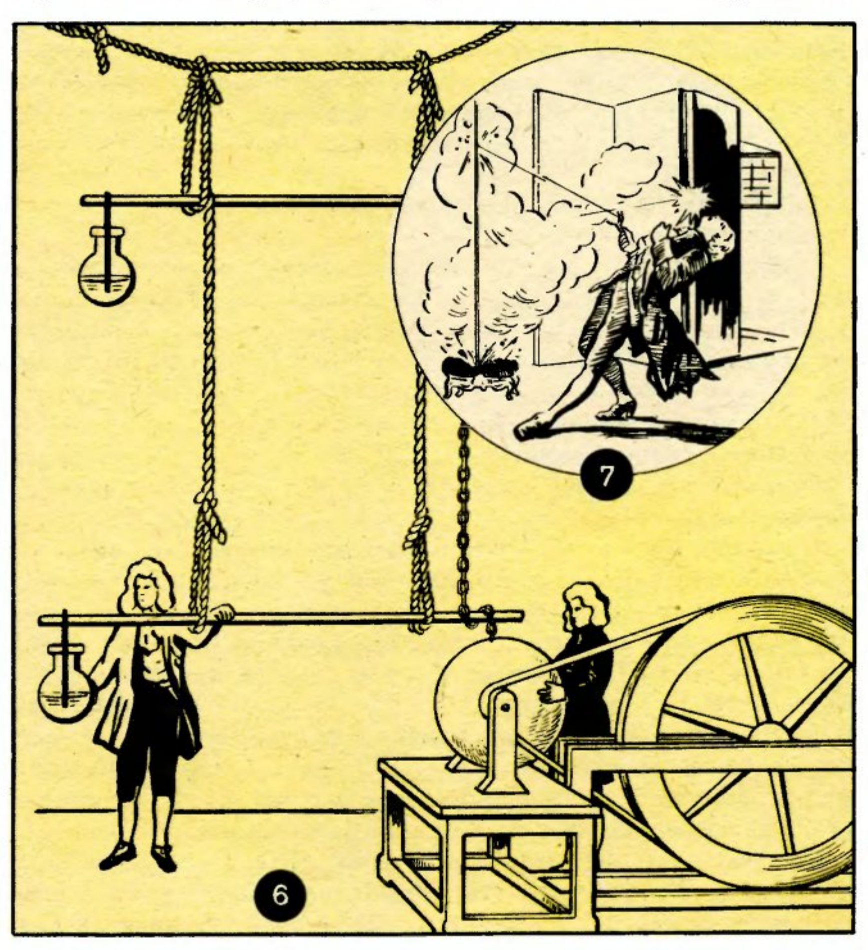
через сообщение, электричество от стеклянного шара, который приводился в быстрое вращение и натирался прикосновением рук. На другом конце свободно висела медная проволока, конец которой был погружен в круглый стеклянный сосуд, отчасти наполненный водой, который я держал в правой руке, другой же рукой я пробовал извлечь искры из наэлектризованного ствола. Вдруг моя правая рука была поражена с такой силой, что все тело содрогнулось, как от удара молнии. Сосуд, хотя и из тонкого стекла, обыкновенно сотрясением этим не разбивается, но рука и все тело поражаются столь страшным образом, что и сказать не могу, одним словом, я думал, что пришел конец...» (рис. 6).

При прохождении электрического разряда человек иногда отделывается только судорожными сокращениями мышц, но нередко неосторожное обращение с электрическими приборами и



установками приводит к тяжелым поражениям и даже к смертельному исходу. Общеизвестна трагическая судьба петербургского профессора Рихмана (современника и друга Ломоносова), убитого электрическим разрядом во время опытов, которые он производил с «громовой машиной» во время грозы. «Первый удар от привешенной линии с ниткой пришел ему в голову,— писал об этом Шувалову Ломоносов,— где красно-вишневое пятно видно на лбу; а вышла из него громовая Електрическая сила из ног в доски. Ноги и пальцы сини, и башмак разодран, а не прожжен» (рис. 7).

Немало зарегистрировано несчастных случаев, происшедших, казалось бы, в мирной домашней обстановке. Причиной всегда оказывалось непростительное пренебрежение элементарными правилами осторожности при обращении с электрическими приборами. Мне, пищущему эти строки, лично памятен драматиче-



ский случай, когда в одной семье мать оставила без присмотра включенным в розетку шнур от электрического утюга. Игравший на полу маленький ребенок подобрался к свисавшему до полу шнуру и засунул пальчики в штепсельные гнезда, снятые с контактов утюга. В тот же миг он упал мертвым.

Считают, что электрический ток вызывает паралич сердца. Обычно смерть наступает тогда, когда сила тока, проходящего через человеческое тело, достигает 0,05—0,1 А. Интересно, что сила тока именно в этих границах представляет наибольшую опасность для человека. При силе тока, значительно большей 0,1 А, смерть не наступает, но возможны тяжелые ожоги. В литературе описаны случаи, когда во время казни на «электрическом стуле» сильный ток не давал сразу желаемого эффекта и человек буквально начинал гореть, прежде чем наступала смерть.

Сила тока, как известно из закона Ома, зависит от напряжения, приложенного к проводнику, и его сопротивления. Сопротивление человеческого тела не всегда одинаково и зависит от многих причин. Если кожа на руках загрубелая, замасленная, то контакт с токонесущими проводами или частями машин будет плохой. Между кожей и металлом окажется слой изоляции с высоким сопротивлением. Наоборот, чистые и особенно мокрые руки создадут очень хороший контакт.

Следует помнить, что опасность подстерегает нас не только тогда, когда мы касаемся обоих подводящих ток проводов. Однополюсное прикосновение также опасно, если человек стоит, например, на влажной земле босой. Техника безопасности обязывает на всех промышленных электрических установках заземлять доступные части машин и приборов. В этом случае нет разности потенциалов (напряжения) между человеком, стоящим на земле, и металлом, соединенным с землей, поэтому опасность поражения устранена.

Сказанное далеко не исчерпывает всех возможных опасных случаев поражения электрическим током. Следует сделать еще одно замечание. Встречаются случаи излишнего «лихачества». «Опытные» электротехники пренебрежительно говорят: «Ну что там, какие-нибудь 120 или 220 В!» Опасная и неумная самоуверенность! Правда, наблюдались случаи, когда люди, при одинаковых условиях получавшие кратковременные электрические поражения, переносили их по-разному: одни мгновенно умирали, другие оставались жить. Оказывается, что на исход влияет еще и то, в какой момент сердечного цикла (сокращение, расширение, пауза) действует электрический удар на сердце.

Не следует, однако, делать неправильных выводов из нашей беседы. Она написана не для того, чтобы запугать начинающих

работать с электричеством. Комично бывает видеть, как на первых практических уроках по электричеству какая-нибудь робкая девочка боится дотронуться до клемм четырехвольтной аккумуляторной батареи и обращается с вопросом к руководителю: «А он не убьет?» Обращение со всеми источниками тока при напряжении меньше 12 В безопасно и не вызовет при контакте никаких неприятных ощущений.

КАК БЫЛ ОТКРЫТ ЭЛЕКТРОН

Игорь готовится к докладу на физическом кружке. Тема доклада: «Как был открыт электрон».

«Существование мельчайших частиц, имеющих наименьший электрический заряд, было доказано многими опытами»,— читает Игорь в учебном пособии. Затем он внимательно прочитывает тот параграф книги, где описываются опыты Иоффе и Милликена, приведшие к открытию заряженной частицы, имеющей самый маленький электрический заряд. Эта частица была названа электроном.

Заключительный абзац параграфа Игорь переписывает в тетрадь: «Электрический заряд — одно из основных свойств электрона. Нельзя представить, что этот заряд можно «снять» с электрона, они неотделимы друг от друга. Электрон — частица с наименьшим отрицательным зарядом». Теперь ему ясно, что заряд не существует отдельно от частицы. Заряд неотделим от электрона, это свойство частицы вещества, как масса этой частицы, которую тоже нельзя у нее отнять.

Масса электрона $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.
Заряд электрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Перенос заряда — это переход электронов с одного тела на другое.

Чтобы сделать представление о заряде электрона более наглядным, отметим, что когда в проводнике сила тока равна 1 А, т. е. в 1 с по проводнику переносится 1 Кл электричества, то это означает, что в 1 с проходит $6{,}288 \cdot 10^{18}$ электронов. Через лампочку мощностью 60 Вт при напряжении 120 В в секунду проходит 3 144 000 000 000 000 000 электронов! Это огромное число, которое невозможно наглядно представить.

Невольно возникает вопрос, насколько можно доверять приведенным числам. Что это — смелое предположение или результат действительных измерений? Если измерений, то кем, когда и как эти измерения проведены. Об этом мы сейчас и расскажем.

Начало истории электрона относится ко второй половине XIX в., когда английский физик Фарадей установил закон электролиза. Вероятно, наши читатели много слышали об одной из самых романтических биографий в истории науки, жизнеописании Фарадея, который из мальчика — разносчика газет, потом ученика переплетчика книг превратился в крупного ученого. В одной из бесед мы расскажем об этом подробнее, а сейчас ограничимся лишь упоминанием об открытии Фарадеем закона электролиза, которое тесно связано с историей электрона.

Разложение химических соединений под действием электрического тока было известно еще до Фарадея. Например, его учителем Дэви было доказано, что вода под действием электрического тока разлагается на водород и кислород; разложением гидроксида натрия Дэви удалось получить металл натрий, из гидроксида калия — калий, из борной кислоты был выделен бор. Фарадей исследовал количественную сторону процесса. Само слово «электролиз» введено им, так же как и термины «электролиты» для растворов кислот, солей, щелочей и оснований, «электроды» для полюсов, подводящих ток к жидкости, «ионы» для частиц, на которые распадается растворенное вещество. Заметим, что слово «ион» греческое, в переводе на русский язык означает «путник», «странник».

Распад электролитов на ионы — электролитическая диссоциация — вызывается не электрическим током, а тем, что вода обладает свойством в 81 раз ослаблять притяжение между ионами в кристаллической решетке химических соединений.

Интересный опыт могли бы вы проделать с электрическим током в электролите, если бы вам удалось раздобыть немного раствора фенолфталеина в спирту[1]. Добавьте несколько капель этого раствора в раствор хлорида натрия (поваренная соль). Опустите в раствор зачищенные концы проводов, присоединенных к полюсам батарейки электрического фонарика. В результате электролиза вблизи катода увеличивается концентрация гидроксид-ионов. Окраска индикатора — фенолфталеина изменяется на малиновый цвет: в нем появилась щелочь, очевидно, гидроксид натрия $NaOH$. Одновременно около анода выделяется хлор.

Наша главная цель — выяснить, как зародилась мысль о существовании электронов. Собственно говоря, на эту мысль наталкивает уже закон электролиза, установленный Фарадеем.

Закон электролиза формулируется следующим образом:

---

[1] В любой аптеке вы можете приобрести таблетки пургена, содержащие фенолфталеин.

Масса вещества, выделившегося на электроде за время Δt при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени:

$$m=kI\Delta t,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от природы вещества.

Сделаем следующий шаг в нашем знакомстве с историей открытия электрона. В 1879 г. Уильям Крукс прочел перед Лондонским Королевским обществом доклад, озаглавленный «Молекулярная физика при сильных разрежениях». В этом докладе он показал, что если в стеклянную трубку впаять с двух концов электроды и из нее откачать воздух, то в трубке на противоположном отрицательному электроду (катоду) конце при высоком напряжении возникает зеленоватое свечение стекла — фосфоресценция. Если положительный полюс будет впаян в другое место, то все равно свечение возникает на конце, противоположном поверхности катода, как если бы от катода шел поток лучей по прямому направлению (катодные лучи). Помещая на пути катодных лучей металлический экран, например в виде звезды, можно получить тень его среди зеленовато-фосфоресцирующей области трубки, что еще больше подтверждает прямолинейность распространения катодных лучей (рис. 8).

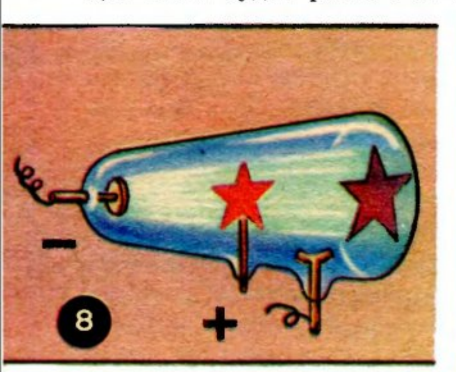
«Кэмбридж! На всей земле, не исключая и Флоренции, не найдется, конечно, второго уголка, который сыграл бы такую роль в истории современной мысли. Кромвель и Мильтон, Бэкон и Байрон, Ньютон и Дарвин — одних этих имен было бы достаточно, чтобы наполнить славой целый мир, а не один только университет... («a universe, not only university...»)». Это патетическое восклицание мы заимствовали из воспоминаний нашего знаменитого ученого, ботаника Климента Аркадьевича Тимирязева, участвовавшего в кэмбриджских празднествах в честь столетнего юбилея со дня рождения Дарвина. В Кэмбридже работал и один из величайших физиков XIX столетия Джозеф Джон Томсон — «тот человек, о котором каждый прохожий знает, что он расколол атом», такое остроумное высказывание было опубликовано в одном популярном английском журнале. Дж. Дж. Томсон тщательно исследовал катодные лучи.

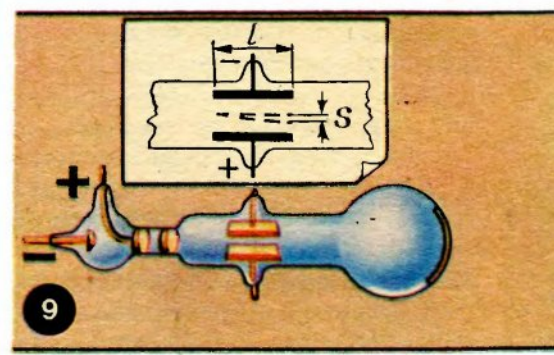
Знаменитые в истории физики опыты Томсона по отклонению катодных лучей в магнитном или электрическом поле показали, что катодные лучи представляют собой пучок быстролетящих электрически заряженных частиц. Томсону удалось доказать, что заряд этих частиц тождествен элементарному заряду, который был обнаружен Фарадеем в опытах по электролизу. Таким образом, катодные лучи — это поток заряженных частиц — электро-

нов. Поскольку электрический ток обладает магнитными свойствами, то естественно, что летящие в трубке электроны отклоняются магнитом. Электрическое поле также действует на заряженную частицу.

Томсон ставил опыты в многочисленных вариантах. Рисунок 9 показывает одну из установок, применявшихся им; на рисунке выделена часть этой установки, которая позволит нам понять идею опыта.

Камень, брошенный горизонтально, отклоняется от горизонтальной линии силой земного притяжения. Подобным же образом электрон отклоняется силой, действующей на него со стороны магнитного или электрического поля. Для магнитного поля эта сила $F=Bev$, где B — магнитная индукция, e — заряд электрона, v — скорость его движения. Для электрического поля отклоняющая сила будет равна Ee. Под действием этой силы электрон





получит ускорение $a=\frac{Ee}{m}$ в направлении к нижней положительно заряженной пластинке конденсатора и сместится от горизонтали на расстояние $s=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\frac{Ee}{m}t^2$. Время прохождения между пластинками конденсатора длиной l найдем по формуле равномерного движения $t=\frac{l}{v}$. Подставляя это значение в формулу для s, получим:

$$s=\frac{1}{2}\frac{Ee}{m}\cdot\frac{l^2}{v^2}.$$

Откуда

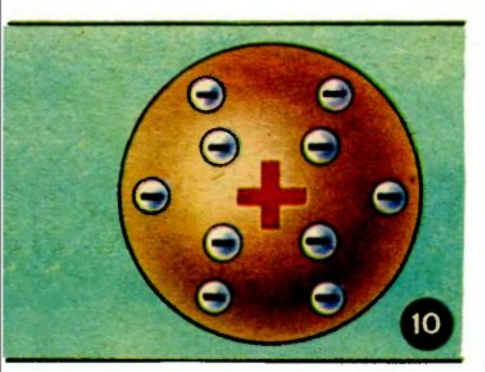
$$\frac{e}{m}\cdot\frac{1}{v^2}=\frac{2s}{El^2}.$$

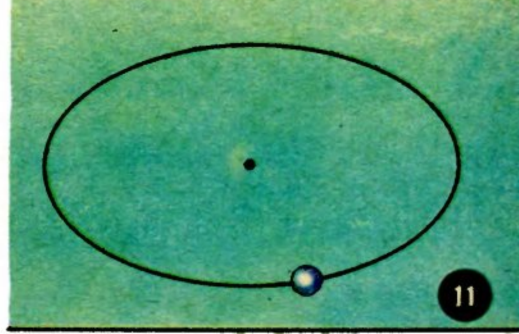
Величины, находящиеся в правой части уравнения, могут быть определены из опыта, в левой же остаются две неизвестные:

отношение $\frac{e}{m}$ и скорость v. Для определения скорости Томсон применил метод уравновешивания действия электрического поля действием соответственно подобранного и соответственно ориентированного магнитного поля. Тогда светящееся пятно на экране останется неподвижным на оси прибора. Так как при этом электрическая и магнитная силы равны, то $Ee = Bev$, откуда скорость $v = \frac{E}{B}$.

Определив скорость, можно по предыдущей формуле найти и отношение $\frac{e}{m}$. Опыт много раз повторялся, и в настоящее время это отношение принимают равным $1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Томсону принадлежит и первый метод определения заряда и массы электрона. Для этого он наблюдал за осаждением в стек-



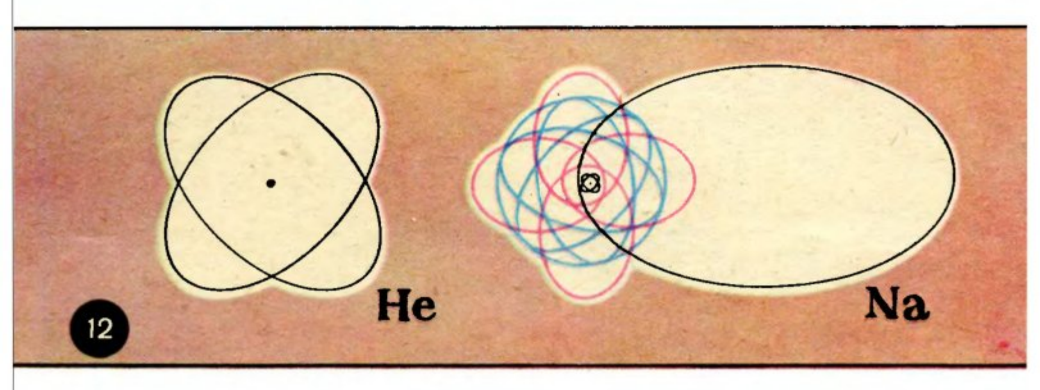


лянном сосуде облака из мельчайших водяных капелек, сконденсировавшихся из насыщенного водяного пара на ионах водорода. Но мы не будем приводить описания этих опытов, так же как не будем приводить и описания более точных опытов американского физика Милли́кена с масляными каплями (1909) и советского физика А. Ф. Иоффе с металлическими пылинками (1912), позволивших установить значение заряда и массы электрона.

Откуда же берутся электроны в описанных опытах с вакуумными трубками? Они выбиваются из металла катода ударами ионов газа, небольшое количество которого должно оставаться в трубке.

Электроны — составная часть каждого атома каждого вещества. Но почему тогда металлы, например, не заряжены? Очевидно, в состав атомов входят еще и положительные заряды, уравновешивающие заряд электронов. Томсон изображал модель атома в виде сплошного шарика с равномерно распределенным

по объему положительным зарядом; внутри шарика, говорил он, находятся электроны наподобие изюма в пудинге (рис. 10). В дальнейшем на основе тонких и сложных экспериментов ученые пришли к планетарной модели атома, согласно которой атом представляет собой как бы планетную систему в маленьком масштабе. Роль Солнца в атомной системе играет положительно заряженное ядро, вокруг него, как планеты в Солнечной системе, вращаются электроны. Эту модель атома предложил английский физик Резерфорд в 1911 г. Простейший атом (рис. 11) — атом водорода имеет только один электрон и соответственно с этим простейшее ядро с одним положительным элементарным зарядом, равным заряду электрона. Ядро с таким зарядом было названо протоном. Атомы других элементов содержат больше электронов и больше протонов. В электрически нейтральном атоме число электронов равно числу протонов.



На рисунке 12 представлены модели атомов гелия и натрия. Можно задать вопрос, почему электроны не соединяются с протонами, ведь противоположные электрические заряды притягиваются. Почему планеты не падают на Солнце, Луна не падает на Землю? Планеты движутся, обладают скоростью, и притяжение к Солнцу, не меняя этой скорости по модулю, все время изменяет ее по направлению, не позволяя планетам умчаться по прямой линии в бесконечные дали пространства. Та же причина не позволяет электронам упасть на ядро. Электроны обращаются вокруг ядра с огромной скоростью. Так, электрон в атоме водорода движется со скоростью 2200 км/с, т. е. со скоростью, почти в 800 раз превышающей скорость реактивного самолета.

Правда, аналогию между электроном на орбите и планетой не следует понимать слишком буквально. Строго говоря, электронные орбиты — это упрощенная модель; в действительности движение электронов в атоме имеет более сложный характер. Однако, разговор об этом выходит за рамки книги.

ДРЕЙФ ЭЛЕКТРОНОВ

ТОК В МЕТАЛЛАХ

Слово «дрейф» взято из морской терминологии от английского drift, что означает снос, отклонение от курса судна в море ветром или течением. Особенно широко стало известно это слово со времени первой советской полярной экспедиции папанинцев в 1937—1938 гг. 274 дня провела четверка героев-смельчаков (Папанин, Кренкель, Ширшов и Федоров) на льдине, увлекаемой течениями от Северного полюса к югу до 70-й параллели.

Но причем тут электроны? Что такое электрический ток?

У К. Паустовского есть рассказ «Подарок», где приводится такой разговор деда с мальчиком. «Нам, старым людям, способнее думать, что к чему на земле притесано и какое имеет объяснение. Ты мне про лесничего не говори. Лесничий — мужик хитрый. Он, когда в Москве жил, то, говорят, на электрическом токе пищу себе готовил. Может это быть или нет?

— Может,— ответил мальчик.

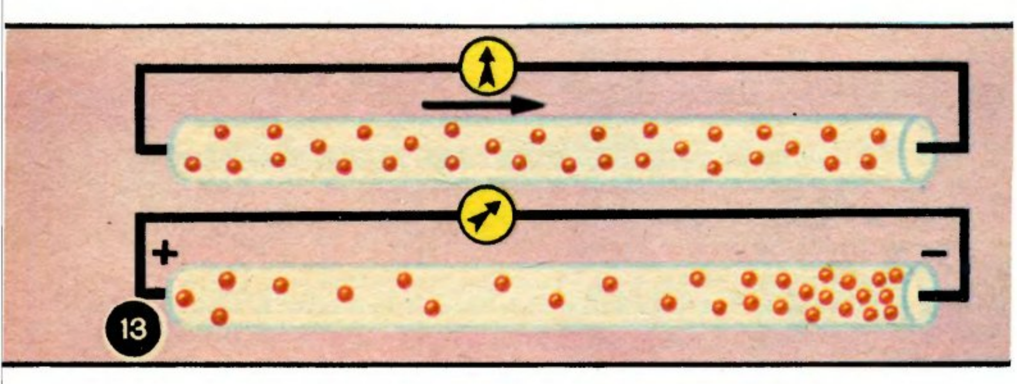
— Может, может,— передразнил его дед.— А ты этот электрический ток видал? Как же ты его видал, когда он видимости не имеет, вроде как воздух?»

Признайтесь, не смутило ли и вас, мои читатели, когда вы первый раз услыхали в школе или прочитали в учебнике физики, что электрическим током называют направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц — электронов в металлических проводах, ионов в растворах солей, кислот и щелочей, электронов и ионов в газосветных трубках и электровакуумных лампах? Особенно в металлах; потому что если в жидкостях и газах движение зарядов можно наблюдать по различным световым эффектам, то движение внутри металлических проводов остается совершенно скрытым и мы можем видеть лишь тепловые и магнитные действия таинственного «электрического тока».

Как же было доказано действительное существование движения электронов в металлических проводах? Идея и выполнение первых качественных опытов, несомненно доказавших, что ток в проводах представляет собой движение электронов, принадлежат нашим отечественным ученым, академикам Л. И. Мандельштаму и Н. Д. Папалекси (1912). Эта идея чрезвычайно проста. Вы знаете, что в состав атомов каждого элемента входят мельчайшие электрические частички — электроны. Надо было только доказать, что некоторые из этих электронов не связаны прочно с ядром атома, а свободно движутся в пространстве между атомами. Представьте теперь, что кусок металлической проволоки

быстро движется в направлении, указанном стрелкой (рис. 13), унося с собой имеющиеся в металле электроны. Что произойдет, если его вдруг резко остановить? То же самое, что происходит в вагоне поезда при внезапной, резкой остановке. Как пассажиры, которые вследствие инерции наклоняются или даже падают вперед в направлении своего движения, так и свободные, не связанные прочно с атомом электроны, подчиняясь закону инерции, сдвигаются в направлении движения проволоки. Поэтому на переднем конце образуется избыток электронов, на противоположном — недостаток. Избыток электронов сообщает переднему концу проволоки отрицательный заряд, недостаток — положительный. В возникновении этих двух полюсов мы можем убедиться, обнаруживая чувствительным прибором наличие тока.

В опытах Мандельштама и Папалекси применялся не прямолинейный провод, а катушка из очень длинной и тонкой изо-



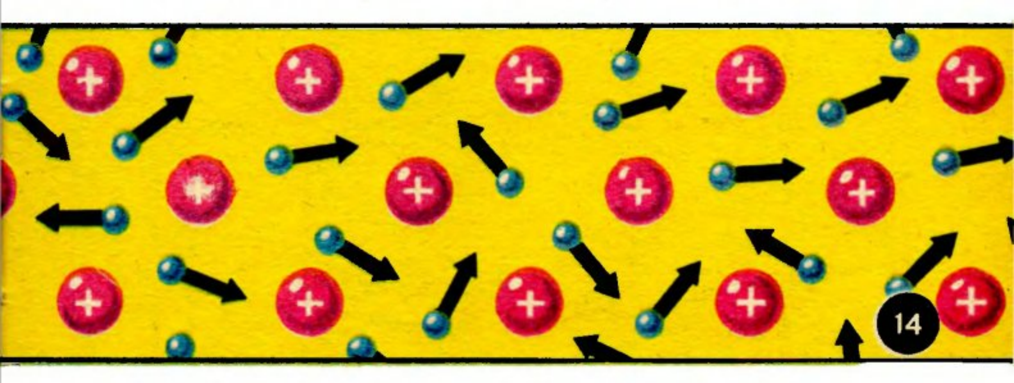
лированной проволоки, совершавшая крутильные колебания вокруг своей оси. Возникавший при перемене направления поворота ток шел то в одном, то в другом направлении, в зависимости от того, в какую сторону поворачивалась катушка. Этот переменный ток обнаруживался при помощи телефона.

В 1916 г. опыт в несколько измененном виде был повторен Толменом и Стюартом, которые для обнаружения тока пользовались чувствительным гальванометром. По отклонению стрелки гальванометра можно было определить, что ток создавался движением отрицательных зарядов (электронов). В этом же опыте снова удалось определить отношение заряда электрона к его массе.

Возникает вопрос, откуда берутся свободные электроны в металле и почему они не сообщают ему отрицательного заряда, раз они свободны. В кристалле металла (вы знаете, что все металлы имеют кристаллическое строение) свободные электроны движутся между узлами решетки (положительными ионами)

беспорядочно (рис. 14), подобно тому как движутся молекулы газа. Вам известно, что молекулы, хотя обладают большой скоростью, не проносятся подобно пулям от одной стенки сосуда, в котором заключен газ, до другой. В результате взаимодействия («столкновений») с соседями они выписывают сложные переплетающиеся траектории. Так и электроны описывают подобные сложные траектории в результате «столкновений» с узлами решетки и друг с другом. Отсюда возникло выражение «электронный газ» для того состояния, в котором находятся свободные электроны в металле (рис. 15).

Не следует, конечно, упрощенно представлять себе «столкновения» электронов. В действительности взаимодействие полей отдельных электронов и ионов изменяет направление и модуль их скоростей. «Сталкивающиеся» электроны разлетаются вовсе не в результате их действительного соприкосновения.



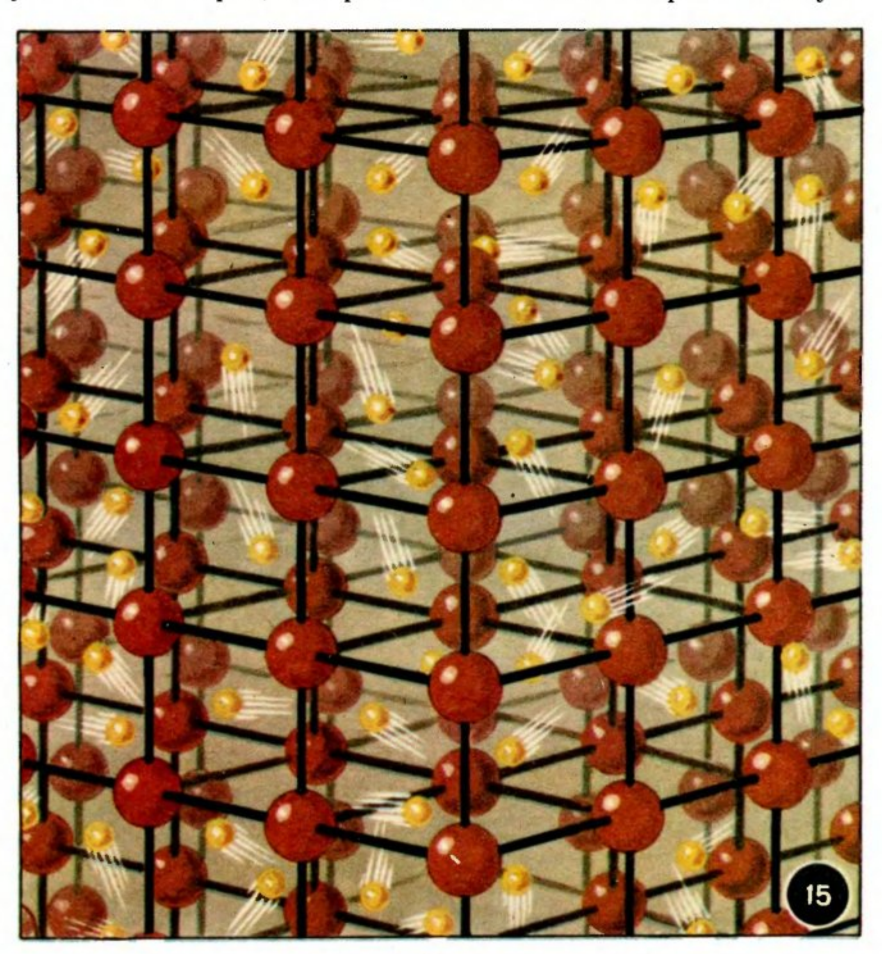
Вследствие беспорядочности движения свободных электронов в металле и огромного числа электронов в единице объема (например, в 1 см^3 меди число свободных электронов выражается двадцатидвухзначным числом) в одном каком-нибудь направлении движется столько же электронов, сколько их движется в противоположном направлении. Поэтому в отсутствие внешнего электрического поля суммарный заряд, переносимый в любом направлении, равен нулю, т. е. тока нет. Равенство же суммы всех отрицательных зарядов электронов и положительных зарядов ионов объясняет, почему общий заряд металла тоже равен нулю. Можно не боясь подносить ко рту алюминиевую ложку — никаких электрических разрядов не последует.

Если к концам проволоки приложить электрическое напряжение, присоединив их, например, к полюсам аккумулятора, то внутри проводника установится электрическое поле. Оно будет действовать на электрические заряды и сообщать им дополнительное движение. В электронном газе возникнет «электриче-

ский ветер» в направлении к положительному полюсу, однако при этом электроны сохранят и беспорядочное движение. Полная аналогия тому, как в воздушных массах, гонимых ветром, сохраняется хаотическое, тепловое движение молекул.

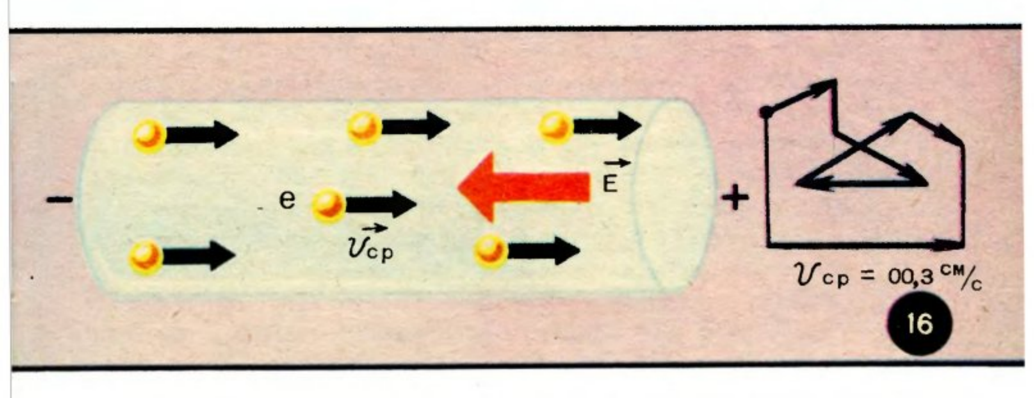
Перед нами «дрейф» электронов. Вследствие столкновений, вернее, воздействия атомных полей, средняя скорость «дрейфа» электронов в проводе сохраняется постоянной (рис. 16). Здесь мы имеем случай, аналогичный падению в воздухе снежинок или пушинок. Несмотря на постоянное действие силы тяжести, их падение не переходит в равномерно ускоренное движение, как это было бы в безвоздушном пространстве, а является в среднем равномерным.

Скорость теплового движения молекул газа сравнима со скоростью артиллерийских снарядов, а скорость воздушных масс, увлекаемых ветром, измеряется несколькими метрами в секун-



ду. Какова же скорость электрического тока? Скорость движения отдельных электронов на протяжении их свободного пробега (от столкновения до столкновения) огромна и достигает больше ста километров в секунду, но скорость упорядоченного перемещения электронов ничтожно мала. Постоянно задерживаемые и отклоняемые от курса, они перемещаются («дрейфуют») вперед медленнее, чем улитка. Улитка проползает в 1 с в среднем 1 мм, электрон в медном проводе сечением 1 мм^2 при силе тока 6 А перемещается в направлении провода со скоростью 0,03 см/с. Мы не можем здесь рассказать вам, как была определена эта скорость. В высшей школе вы узнаете об эффекте Холла, позволяющем определить ее.

Но все же разве можно сказать, что скорость электрического тока в проводах мала?! Ведь стоит повернуть выключатель, и электрические лампы сейчас же загораются. Говоря по между-



городному телефону, не получаем ли мы впечатления, что наш собеседник на расстоянии сотен и тысяч километров от нас слышит нас в тот же момент, когда мы произносим: «Алло!» Как же примирить это противоречие — медленное передвижение электронов вдоль провода и быструю передачу сигнала? Чтобы понять это противоречие, необходимо уяснить себе, что именно мы подразумеваем под скоростью тока. Это не есть скорость движения электронов — это скорость распространения электромагнитного поля, вызывающего направленное движение электронов. Скорость распространения электромагнитного поля равна 300 000 км/с. Академик Иоффе приводит такой интересный расчет. Если на одном конце телеграфного провода, например в Ленинграде, изменить потенциал на 10 В, то наблюдатель в Москве заметит появление тока через $\frac{600\ \text{км}}{300000\ \text{км/с}} = 0{,}002$ с! Но те заряды, которые в данный момент находятся в Ленинграде, переместились бы в Москву лишь через 100 000 лет!

Электромагнитное поле распространяется почти мгновенно, поэтому и приводит в направленное движение электроны почти одновременно во всем проводнике. Как по команде!

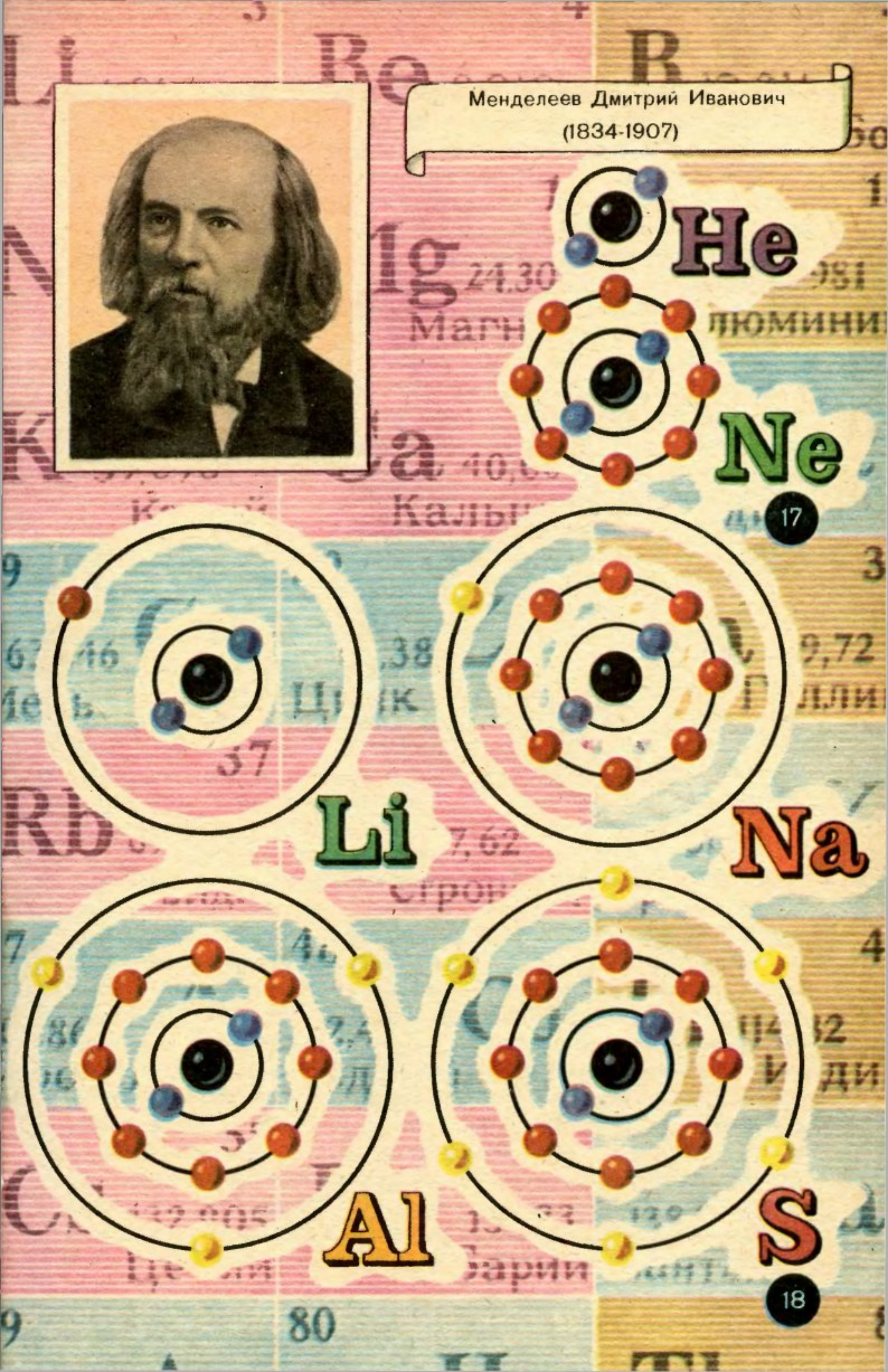
«Пер-рвая полурота... Равнение направо... Шагом... арш!

Видно было, как от наклонного леса штыков отделилась правильная линия и равномерно закачалась в воздухе» (А. Куприн. «Поединок»). Команда со скоростью звука пролетает всю линию солдат в какие-нибудь доли секунды. Мы не улавливаем этой скорости, и кажется, будто вся линия штыков приходит одновременно в движение. Каждый же отдельный солдат, подчиняясь команде, начинает шагать со своей собственной скоростью, соразмеряя ее с общим темпом церемониального марша.

Электроны входят в состав всех элементов. Но почему различные вещества обладают различной проводимостью по отношению к электрическому току? Для выяснения этого обратимся снова к теории строения атомов. В настоящее время известно более 100 различных элементов. Изучению их свойств помогает периодическая система Менделеева. Дмитрию Ивановичу Менделееву, профессору химии в Петербургском университете, в 1869 г. пришла удачная мысль расположить все известные в то время химические элементы в порядке возрастания их атомных масс. При этом он обнаружил удивительную закономерность — периодическую повторяемость основных химических свойств. Расположив элементы по периодам, он составил таблицу, в которой химически родственные элементы образовали группы, сходные по свойствам. Впоследствии электронная теория атома раскрыла физическую причину периодического закона Менделеева. Каждый элемент в таблице имеет свой порядковый номер, который определяется зарядом атомного ядра, а следовательно, количеством электронов в атоме.

Химические свойства элементов зависят от характера группировки электронов вокруг ядра. Электроны обращаются вокруг ядра, располагаясь последовательно в различно удаленных от него слоях. В таких последовательных слоях (или оболочках) может находиться не больше 2, 8, 18, 32 электронов. При этом на крайней внешней оболочке число электронов не может пре-

Элемент	Порядковый номер	Число элементов в I, II, III, IV, V, VI оболочках
He	2	2
Ne	10	2 8
Ar	18	2 8 8
Kr	36	2 8 18 8
Xe	54	2 8 18 18 8
Rn	86	2 8 18 32 18 8


Менделеев Дмитрий Иванович
(1834-1907)
He
Ne
17
Li
Na
Al
S
18

вышать 8. Это наглядно показано в таблице элементов нулевой группы (см. табл. на с. 22).

Это весьма существенно для понимания дальнейшего. Наличие 8 электронов на внешней оболочке придает атому устойчивость и в то же время химическую инертность. Элементы нулевой группы относятся к инертным газам.

У элементов прочих групп внешняя оболочка не является заполненной, т. е. содержит электронов меньше 8. В первой группе на внешней оболочке находится 1 электрон, во второй — 2 и т. д. Взгляните на схемы атомов нулевой группы (He, Ne) и первой группы (Li, Na) (рис. 17,18). Бросается в глаза обособленное положение единственного электрона, обращающегося на внешней, наиболее удаленной, орбите элемента лития и натрия, по сравнению с расположением электронов в атомах гелия и неона. Удаленность от ядра означает и значительное ослабление связи между зарядами ядра и электрона. Такой электрон может покинуть свой атом и перейти к соседнему атому, затем к следующему и т. д. Свойством терять свои внешние электроны отличаются и прочие металлы. Эту особенность легко объяснить, так как количество электронов на внешних оболочках атомов металла 1, 2, 3. Например, у типичного проводника — алюминия (см. рис. 18) электронов на внешней оболочке 3. Алюминий — трехвалентный элемент. Для него более «предпочтительно» потерять эти 3 непрочно связанных с атомом электрона, чем получить от соседних* недостающие до стабильности 5 новых электронов. Потеряв свои три валентных электрона, атом алюминия превращается в ион алюминия Al^{+3} и теперь способен присоединить к себе три каких-нибудь одновалентных иона с противоположным знаком заряда, например образуя молекулу $AlCl_3$.

Металлы являются «расточителями» электронов. Освободившиеся электроны и сообщают металлу хорошую электропроводность. Возьмем теперь в качестве примера серу. У нее на внешней оболочке электронов 6, и для серы более «предпочтителен» захват дополнительных двух электронов, чем утрата всех шести крайних электронов. Таким образом, сера является «ловушкой электронов». Ион S^{-2} в случае захвата атомом двух электронов имеет два неуравновешенных отрицательных заряда.

В твердом состоянии металлы образуют решетку, в узлах которой находятся положительно заряженные ионы, в кристаллах же твердых изоляторов решетка состоит не из ионов, а из нейтральных атомов. Свободных электронов в них нет, и электропроводность их должна равняться нулю. Между такими двумя крайними случаями — совершенных проводников и идеальных изоляторов — возможны различные промежуточные в зависимости от атомного строения элементов. Различные вещества обла-

дают поэтому различной электропроводностью, или, как чаще говорят, различным электрическим сопротивлением. Из таблицы, в которой приведены примеры наиболее хороших проводников и изоляторов, видно, что удельное сопротивление может изменяться от 0, 000000016 до 100 000 000 000 000 000 Ом • м! Едва ли можно указать другую физическую величину, числовые значения которой колебались бы в столь широких пределах!

Вещество	Удельное сопротивление, Ом • м	Вещество	Удельное сопротивление, Ом • м
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Стекло	10^{10}
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Кварц	10^{15}
Алюминий	$2,9 \cdot 10^{-8}$	Янтарь	10^{17}

Число свободных электронов в металлах близко к числу атомов в нем, во всяком случае оно огромно. Это связано с тем, что от каждого атома, как было уже сказано, отделяется по одному или больше электронов, которые и «блуждают» между положительными ионами решетки. Ионы решетки находятся при этом в колебательном состоянии. При прохождении тока «дрейфующие» электроны, сталкиваясь с ионами, отдают приобретенную от внешнего поля энергию, и колебания решетки усиливаются — металлический проводник нагревается током.

Сопротивление металлов зависит также от температуры. С повышением температуры оно увеличивается, потому что «пробираться» электронам среди быстро колеблющихся ионов труднее, чем если бы ионы двигались медленнее или совсем были бы неподвижны.

ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

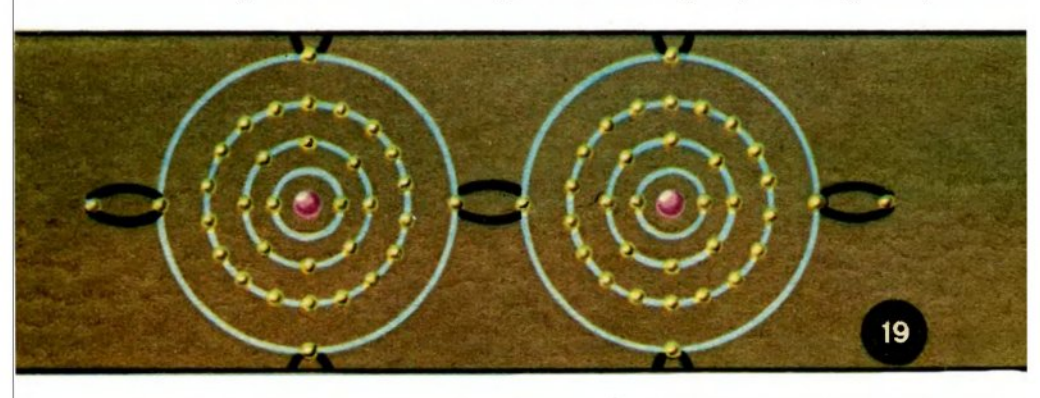
В современной технике широко используют материалы, которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками и получили поэтому название полупроводников. К ним относятся как химические элементы (германий, кремний, селен), так и соединения элементов (с кислородом, серой и др.).

Основное отличие полупроводников от проводников в том, что в них вследствие более прочной связи электронов с атомами число свободных электронов значительно меньше числа атомов. Повышение температуры вызывает резкое увеличение числа свободных электронов, а следовательно, электропроводности. В этом отношении свойство полупроводников обратно свойству металлов. В металлах, как известно, сопротивление с повышением температуры возрастает.

Не только нагревание, но и другие внешние воздействия на полупроводники — свет, рентгеновские или ультрафиолетовые лучи, радиоактивное излучение — приводят к увеличению проводимости. Эта особенность полупроводников и объясняет чрезвычайное разнообразие практического применения их в современной технике. Особенно широко используются германий и кремний.

Попытаемся понять сущность процессов, происходящих в полупроводниках, и выяснить своеобразие явления их проводимости на примере германия.

Германий принадлежит к IV группе периодической системы и занимает тридцать второе место. Это означает, что ядро атома имеет заряд +32, вокруг ядра обращается столько же электронов, орбиты которых расположены в четырех слоях, или оболочках. В первой оболочке находятся 2 электрона, во второй 8, в

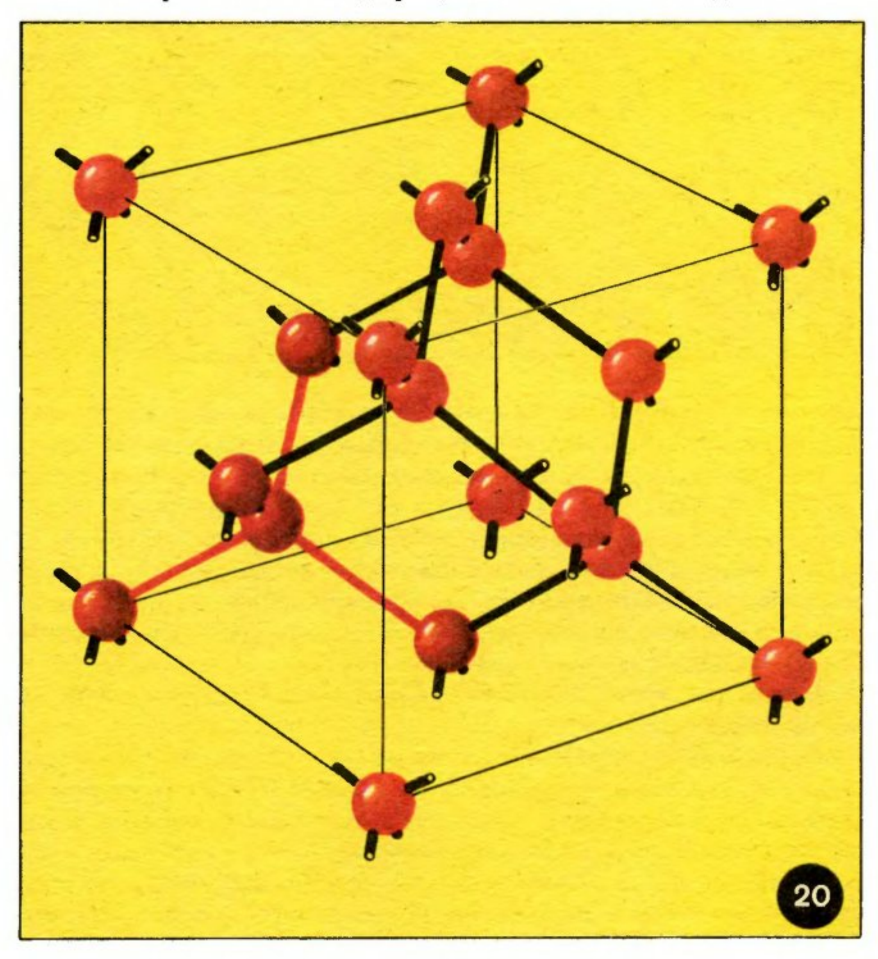


третьей 18, а на внешней незаполненной оболочке — 4 электрона. Германий — четырехвалентный элемент (рис. 19). В твердом состоянии германий образует пространственную решетку (рис. 20). Атомы находятся в узлах решетки, вернее, колеблются около узлов. Связь между узлами осуществляется при помощи валентных электронов. Чтобы нагляднее представить эту связь, условно изобразим строение кристалла в виде плоской схемы (рис. 21). Атомы связаны парноэлектронными связями, распространяющимися и на соседние атомы. Проследите за передвижением какого-нибудь электрона, и вы увидите, что он может переходить от одного атома ко второму, третьему и вся совокупность атомов окажется связанной электронным облаком. Такая электронная связь называется ковалентной связью. Собственно свободных электронов проводимости в рассмотренном нами случае нет. Несмотря на оживленное внутреннее движение валентных электронов, идеально чистый германий должен быть совершенным изолятором. На рисунке 22 связь между ато-

мами при помощи пары электронов показана более упрощенно. Из рисунка видно, что каждый из атомов германия связан парными связями с четырьмя соседними атомами, что приводит к образованию устойчивой восьмиэлектронной системы.

Допустим теперь, что в некоторых атомах под влиянием внешних воздействий (повышения температуры и др.) произошел обрыв одной такой связи и некоторые электроны стали свободными, хаотически перемещающимися внутри решетки. В том месте, где произошел разрыв, образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют дыркой. Дырка имеет положительный заряд (рис. 23). На место образовавшейся дырки может перескочить электрон от соседнего атома, что приведет к возникновению новой дырки. Таким образом, перескок электронов сопровождается «перемещением дырок».

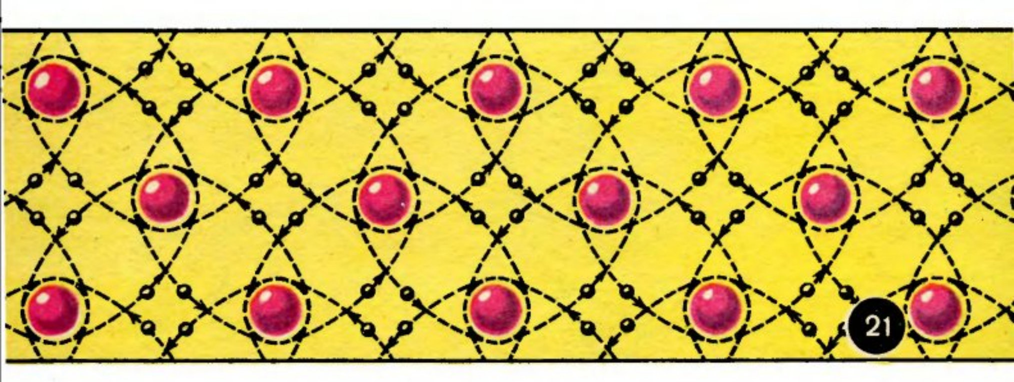
В электрическом поле дырки, так же как и свободные элект-



роны, совершают направленный «дрейф», но в противоположную сторону (от «+» к «—»). От латинского слова negativ — отрицательный — электронную проводимость называют *n*-проводимостью, а дырочная проводимость называется *p*-проводимостью, от латинского positiv — положительный.

Чистый полупроводник обладает одновременно и той, и другой проводимостью.

Когда к полупроводнику прибавляется небольшое количество примеси, он приобретает (в зависимости от выбора примеси) или дырочную, или электронную проводимость. Обратимся опять к германию. Электронная проводимость получается в том случае, если в германий в виде примеси вводится элемент с валентностью, на единицу большей валентности германия, например мышьяк (As) или сурьма (Sb). Атомы элементов пятой группы периодической системы имеют пять валентных электронов. Из



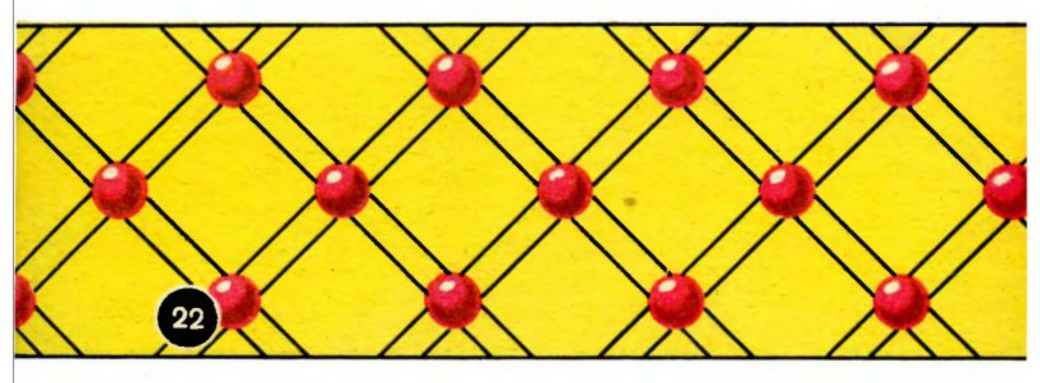
них четыре пойдут на образование четырех электронных парных связей, а пятый остается свободным, и мы получим кристаллы с электронной проводимостью. Если заменить некоторые атомы германия атомами элементов третьей группы — индия (In), галлия (Ga), алюминия (Al), то чужой примесный атом сможет образовать только три электронные пары с германием, для образования четвертой электронной пары у примесного атома не хватит одного электрона. Образуется дырка, и кристалл будет обладать дырочной проводимостью.

Где и как могут быть использованы удивительные свойства полупроводников?

Сначала познакомимся с двумя видами применения полупроводников, которые встречаются во многих радиоэлектронных устройствах,— применением их в качестве выпрямителей и в качестве усилителей тока и напряжения.

Выпрямители. Приведя в тесное соприкосновение два полупроводника с различным типом проводимости, можно получить

устройство — полупроводниковый диод, пропускающий ток преимущественно в одном направлении (от p к n). Но почему? На границе соприкосновения полупроводников образуется тончайший, в доли микрометра, слой. Вследствие перехода через границу противоположных зарядов происходит обеднение слоя основными носителями зарядов. Этот слой поэтому обладает повышенным сопротивлением, он называется запирающим слоем. Подведем теперь к концам диода переменное напряжение (рис. 24). В тот момент, когда у дырочного полупроводника оказывается положительный полюс, а у электронного — отрицательный, дырки и электроны под действием электрического поля будут двигаться в направлении к запирающему слою и обогащать его носителями зарядов, сопротивление уменьшится, в цепи пойдет ток от «+» к «—». Во время другого полупериода направление напряженности поля изменится на противоположное, электроны



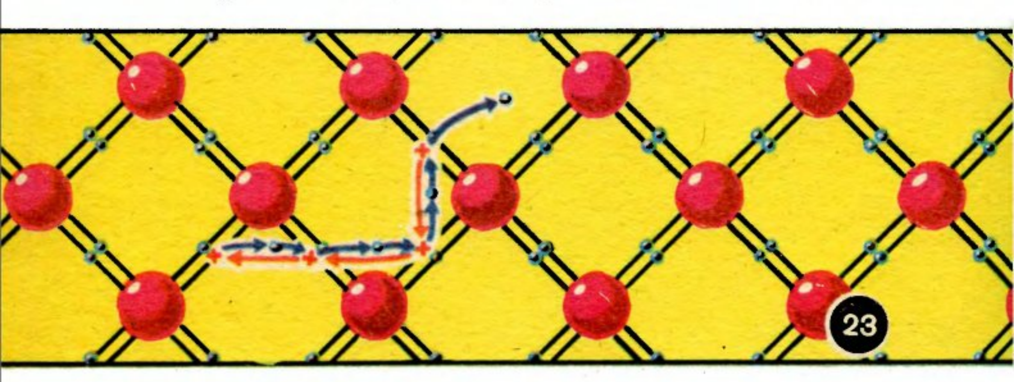
и дырки сдвинутся от пограничного слоя, запирающий слой станет шире, сопротивление его сильно возрастет, ток практически прекратится до новой перемены направления напряженности поля (рис. 25).

Такое же объяснение имеет выпрямляющее действие кристаллического детектора в радиоприемниках, а также действие применяемых для зарядки аккумуляторов купроксных и селеновых выпрямителей. Крошечные размеры, высокий КПД, механическая прочность и почти не ограниченный срок службы составляют преимущество полупроводниковых выпрямителей перед ламповыми. На рисунке 26 показан сравнительный размер германиевого диода и лампового диода — кенотрона. Условное обозначение диода показано на рисунке 27.

Усилители. Использование двойного электронно-дырочного перехода привело к появлению полупроводниковых триодов, или транзисторов, применяемых для усиления тока или напряжения.

Рассмотрим схему одного из вариантов полупроводникового

усилителя (рис. 28). Транзистор представляет собой соединение трех полупроводников (например, в такой последовательности: $p-n-p$). К полупроводнику с электронной проводимостью с двух сторон присоединяются полупроводники с дырочной проводимостью. Левый (входной) полупроводник называется эмиттером (от слова «эмиссия» — испускание). Под действием электрического поля источника тока с ЭДС около 1 В дырки из эмиттера «впрыскиваются» в промежуточный слой. Промежуточный слой носит название «базы». Толщина промежуточного слоя очень мала — несколько микрометров, и поэтому дырки, проникшие в базу, не успевают нейтрализоваться ее электронами и проходят под действием поля правой батареи в третью часть триода — коллектор. Таким образом, через весь триод от эмиттера к коллектору идет почти одинаковый ток. Незначительное изменение напряжения в цепи эмиттера вызывает изменение силы



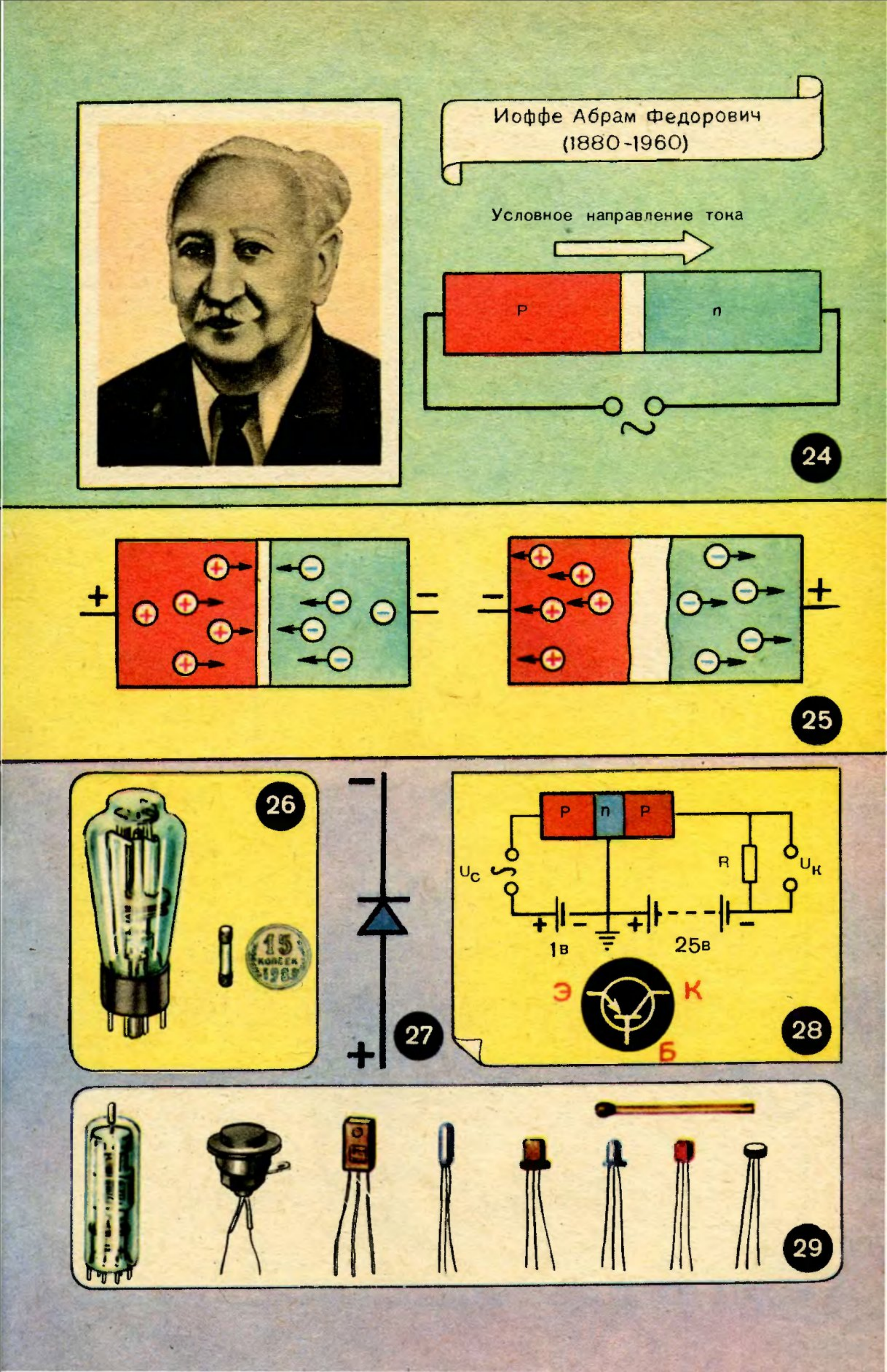
тока как в эмиттере, так и в коллекторе. Благодаря большому нагрузочному сопротивлению в цепи коллектора напряжение на выходе U_k изменяется значительно сильнее, чем напряжение U_c, подаваемое на эмиттер (см. рис. 28).

Крошечные по размерам, иногда в несколько миллиметров (рис. 29), полупроводниковые выпрямители и усилители позволяют применять их в самых маленьких радиоприемниках.

На рисунке 30 представлена электрическая схема слуховых очков. Обратите внимание на малюсенькую батарейку питания всей системы.

Многие применения полупроводников основаны на их чувствительности к изменению температуры. Повышение температуры на 1°C увеличивает электропроводность на 3—6%, повышение на 100°C вызывает увеличение электропроводности в 50 раз. Это позволяет использовать полупроводники для создания очень чувствительных термометров.

Размещенные в различных точках какого-нибудь теплового

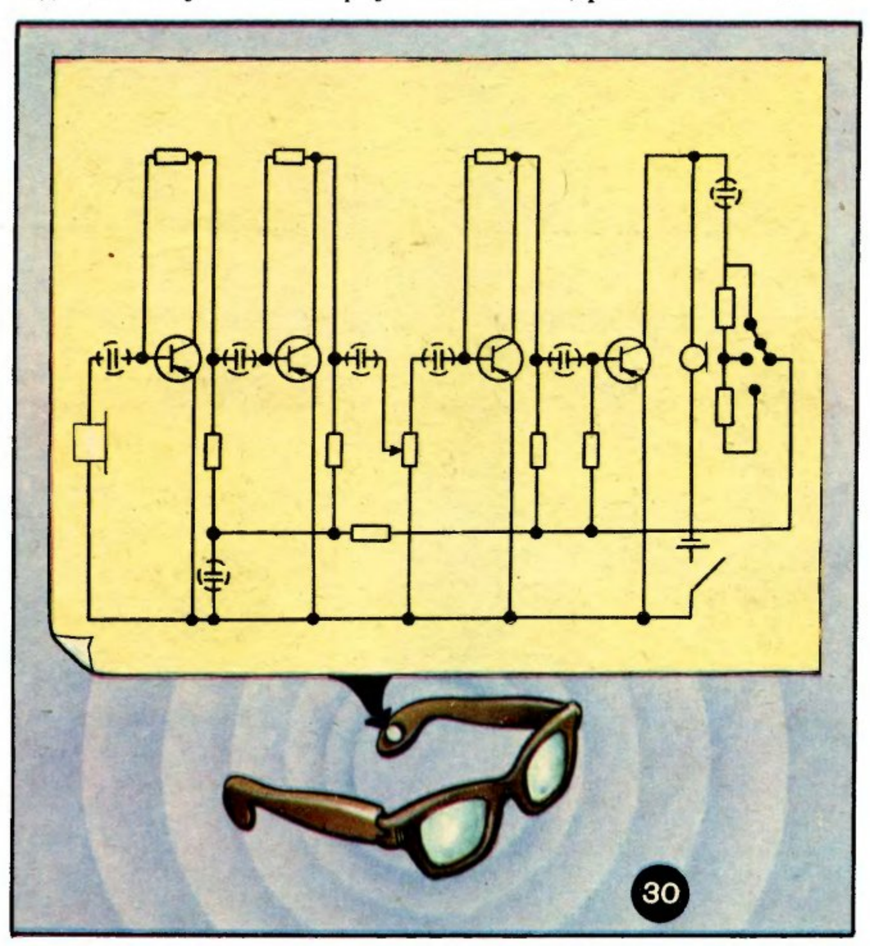

Иоффе Абрам Федорович
(1880-1960)
Условное направление тока
p
n
24
25
26
27
28
p
n
p
Uc
R
Uк
1в
25в
Э
К
Б
29

агрегата (например, на теплоходе), термометры позволяют контролировать его тепловой режим. В биологии и медицине такие приборы (термисторы) делают возможным измерение температуры листьев растений или отдельных точек на поверхности кожи.

При одностороннем нагревании спаев различных полупроводников или полупроводников и металлов они могут служить источниками электрической энергии. Такие термоэлектрогенераторы, нагреваемые, например, керосиновой лампой, обеспечивают питание некоторых батарейных радиоприемников.

Полупроводники могут превращать непосредственно энергию солнечных лучей в электрическую энергию. Такие солнечные батареи устанавливаются на космических кораблях.

Академик А. Ф. Иоффе, работы которого в области полупроводников получили всемирную известность, рисовал такие заман-



чивые перспективы, когда полупроводники можно будет весьма экономично использовать для отопления жилищ. «Везде и всюду, где имеются в природе или в производстве источники тепла, они будут производить электрическую энергию. Везде, где есть электроэнергия, можно создавать тепло или холод, осуществляя любые производственные процессы»,— писал он. «По темпам развития и значению учения о полупроводниках, одной из самых молодых отраслей науки, по возрасту совпадающей с учением об атомном ядре, ее можно поставить непосредственно вслед за ядерной физикой».

Подробнее о некоторых чудесных приборах полупроводниковой техники мы еще будем иметь случай побеседовать в дальнейшем. Здесь же мы ограничились лишь первым ознакомлением читателей с особенностью движения электронов в полупроводниках, столь отличного от движения электронов в металлах.

ПОНЯТИЕ О ЗОННОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Почему одни металлы (серебро, медь) обладают большой электропроводностью, другие (висмут, ртуть) — малой?

Почему углерод в виде графита — хороший проводник электричества, а в виде алмаза — почти идеальный изолятор?

Почему проводимость у металлов при высоких температурах меньше, чем при низких, а у полупроводников наоборот?

Ответ на эти и многие другие вопросы дает современная зонная теория проводимости.

Зонная теория проводимости является одним из разделов квантовой механики. Не имея возможности пользоваться аппаратом квантовой механики, мы ограничимся основными положениями теории без математического обоснования.

Прежде всего нужно несколько расширить те сведения о строении атома, которые были изложены в беседе «Как был открыт электрон». Вы помните, что, согласно модели, предложенной Резерфордом, атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого движутся электроны, причем их суммарный отрицательный заряд равен заряду ядра.

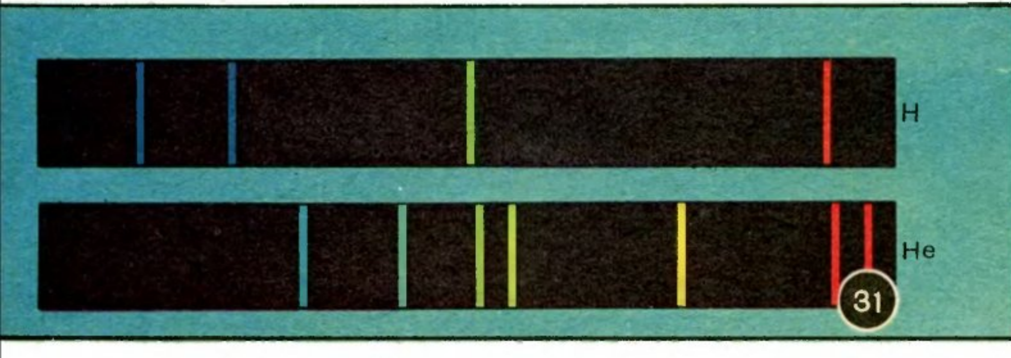
Модель Резерфорда получила название «планетарной» за сходство строения атома с картиной движения планет вокруг Солнца.

Однако планетарная модель совершенно не затрагивала вопроса о том, как располагаются электроны в оболочке. Равным образом не связывала она и явление излучения света со строением атома. На мысль о необходимости существования связи

между излучением и строением атома наводил известный уже тогда факт, что каждому химическому элементу в газообразном или парообразном состоянии соответствовал вполне определенный набор линий в спектре.

Если через газ, например водород или гелий, пропускать электрический ток, то при некоторой степени разрежения газа, заключенного в стеклянную трубку, он начинает светиться. Вы, конечно, видели световые рекламы из таких трубок, светящихся оранжевым (неон) или синим (аргон) светом. Если рассматривать это свечение в спектроскоп, то мы увидим спектры, состоящие из нескольких цветных линий, свойственные соответствующим элементам. На рисунке 31 показаны спектры, принадлежащие наиболее простым по строению атомов элементам — водороду и гелию.

Так как обнаружилось, что получаемые от данных газов



спектры независимо от количества взятого газа всегда состоят из одних и тех же линий, расположенных в одних и тех же местах спектра, то естественно было предположить, что должна существовать связь между спектром и строением атома данного элемента. Эту связь установил в 1913 г. датский физик Нильс Бор. Он усовершенствовал теорию Резерфорда. В основу своей теории строения атома Бор положил следующие постулаты (утверждения, принимаемые без доказательства).

Первый постулат: атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия; в стационарном состоянии атом не излучает.

Согласно второму постулату Бора, при переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитной энергии.

Имеется не одна, а ряд разрешенных орбит, на которых может находиться данный электрон. Ближайшая к ядру орбита

соответствует устойчивому состоянию электрона. Находясь на орбите, электрон может неограниченно долго вращаться вокруг ядра. Но если сообщить электрону каким-либо образом добавочную энергию извне, то при определенной порции добавочной энергии он может перейти на более удаленную орбиту или совсем покинуть атом. В последнем случае атом, потерявший электрон, называется ионизованным; если электрон остается в системе атома, но только переходит на более удаленную орбиту, то атом становится возбужденным.

Электрон в возбужденном атоме обладает дополнительным запасом потенциальной энергии. Состояние возбуждения длится миллиардную долю секунды. Как и всякая система, электрон в атоме стремится перейти в состояние с минимальной потенциальной энергией и возвратиться на орбиту, ближе расположенную к ядру. При этом излучается избыток сообщенной атому энергии в виде света — в спектроскоп можно увидеть соответствующую цветную линию. Какую, это зависит от порции энергии, отдаваемой электроном при переходе.

Так как в атоме каждого элемента возможны только некоторые разрешенные орбиты для электронов, то получать и испускать энергию атом может только строго определенными порциями — квантами.

Теория Бора оставила нерешенными ряд вопросов. Прежде всего она не ответила, почему имеются только некоторые разрешенные орбиты. Попытку дать ответ на этот вопрос делает волновая механика.

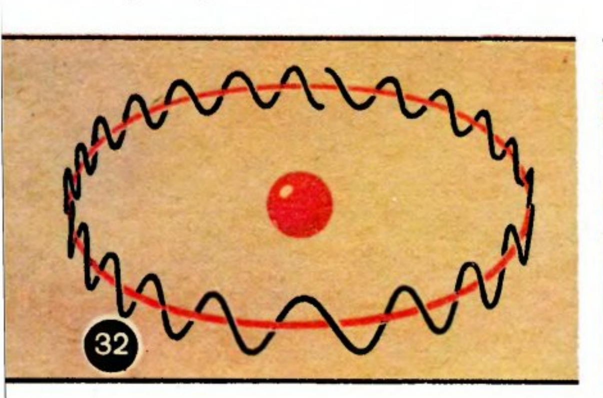
Новые идеи, развитые де Бройлем и Шредингером, совершенно меняют наше представление об электроне. С понятием электрона связывается теперь понятие о некоей волне. Электроны обладают одновременно корпускулярной и волновой природой. Когда волна, обойдя вокруг центра (центра масс системы «ядро — электрон»), возвращается в той же фазе (рис. 32), с какой она начала движение, мы имеем дозволенную орбиту, движение может продолжаться непрерывно до бесконечности. Когда же она приходит в фазе, не совпадающей с исходной, то орбита не может замкнуться. Такая орбита невозможна, «недозволена».

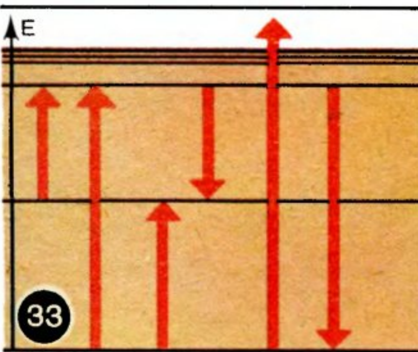
Разным разрешенным орбитам отвечают разные числа электронных волн, укладывающихся на полной длине орбиты. Чем ближе к ядру, тем меньше число длин волн. Ясно, что если это число близко к единице, т. е. если длина волны того же порядка, что и длина орбиты, данные представления становятся неприемлемыми. Поэтому следует с осторожностью пользоваться наглядным представлением об электронных волнах, укладывающихся целое число раз на орбите.

К сожалению, математические трудности квантово-волнового учения заставляют нас отказаться от более детального объяснения.

После предварительных разъяснений обратимся к изложению основных понятий зонной теории, которая позволит получить ответы на поставленные в начале беседы вопросы, касающиеся электропроводности твердых тел.

Прежде всего мы должны усвоить понятие об энергетических уровнях атома. Когда электрон переходит на новую, более удаленную от ядра орбиту, то этим он обязан получению извне определенной порции энергии и, следовательно, на новой орбите он обладает большей энергией. Это означает, что электрон переходит на более высокий энергетический уровень. Так получается исходная картина, которая понадобится для понимания зонной теории (рис. 33). Учтите, что высота ступеньки вовсе не совпа-





дает с пространственным удалением электрона от ядра, помните, что вертикальный масштаб энергетического графика приводится в единицах энергии, а не в единицах длины. Энергетические уровни на графике изображаются рядом горизонтальных линий — разрешенных уровней энергии. Самый нижний уровень соответствует минимуму энергии, какой обладает электрон в невозбужденном атоме.

Почему все электроны не упадут на нижний уровень? Фундаментальное положение квантовой теории — принцип Паули — дает на это ответ. Согласно этому принципу два или больше электронов не могут одновременно находиться в одной системе в тождественном квантовом состоянии. Если все состояния, отвечающие данному энергетическому уровню, заняты электронами, то уровень называют «заполненным». Новые электроны должны занимать состояния на следующих ступеньках энергетической лестницы.

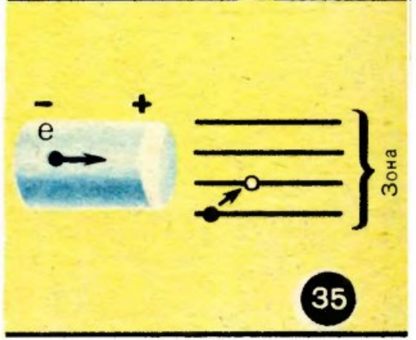
Ограничимся сказанным об энергетических уровнях изоли-

рованного атома и обратимся к твердому телу, рассматривая его как огромное скопление атомов.

При сближении атомов и образовании кристаллической решетки энергетические уровни валентных электронов смещаются, расщепляются и расширяются, превращаясь в энергетические зоны. Вместо одного уровня в кристалле, состоящем из N атомов, образуется N уровней, несколько отличающихся друг от друга. Поскольку N — число очень большое, энергетическому уровню атома в твердом теле соответствует энергетическая зона. В пределах зоны энергия электрона может изменяться практически непрерывно. Зоны разрешенных энергетических уровней чередуются с зонами, в которых электрон находиться не может, это — «запрещенные» зоны. На рисунке 34 изображена схема разрешенных и запрещенных зон.

Электрический ток в зонной теории связывается с перехо-





дами электронов с низших уровней на более высокие в пределах зоны (рис. 35). Однако для так х переходов необходимо, чтобы в зоне имелись незанятые (вакантные) уровни. Поэтому такие незаполненные или не полностью заполненные электронами зоны называются зонами проводимости.

Нижние зоны, как зоны меньшей потенциальной энергии, всегда заполнены. Их электроны в явлении электропроводности не участвуют, так как для «переброса» их в верхние, свободные, зоны потребовалась бы энергия, значительно превышающая ту, которую могут сообщить обычные электрические генераторы. В явлениях электрического тока могут участвовать лишь электроны верхних зон, и то при условии, что в них имеются незаполненные уровни. Рисунок 36 объясняет с точки зрения зонной теории различие проводников и диэлектриков.

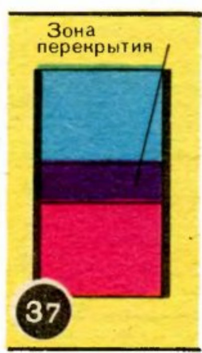
В некоторых случаях незаполненная и заполненная зоны могут перекрываться (рис. 37), запрещенная зона между ними закрывается, и образовавшаяся от слияния двух зон новая, бо-

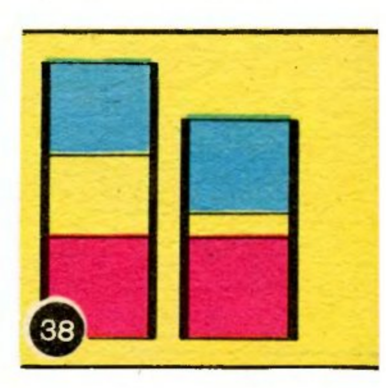
лее широкая, отвечает вышепоставленным условиям проводимости — перед нами проводник. Именно такой случай мы имеем в кристаллах графита. В то же время кристаллы алмаза, обладающие решеткой иного строения, не дают перекрытия зон, и алмаз относится к непроводникам.

Различия в электрических свойствах разных твердых тел объясняются различным заполнением разрешенных зон электронами и шириной запрещенных зон. По характеру распределения зон полупроводники приближаются к диэлектрикам, с той только разницей, что интервал между заполненной зоной и зоной проводимости у полупроводников значительно меньше (рис. 38, справа), чем у диэлектриков (рис. 38, слева).

При очень низких температурах полупроводники не проводят тока, но при повышении температуры их электропроводность резко увеличивается. Незначительного повышения температуры







достаточно, чтобы электроны могли перескакивать узкую запретную зону и попадать в зону проводимости. Конечно, тепловое движение узлов кристаллической решетки полупроводника усиливается при возрастании температуры, как и у металлов. Это колебательное движение узлов решетки полупроводника также препятствует направленному движению электронов. Но увеличение количества носителей зарядов при нагревании преобладает в полупроводнике, и поэтому электропроводность его с повышением температуры возрастает.

Проводимость химически чистых полупроводников называется собственной проводимостью. При практическом применении полупроводников большее значение имеет примесная проводимость. Введенные в полупроводники примеси приносят с собой и примесные энергетические уровни, которые располагаются в запрещенных зонах.

Как уже было сказано, примеси могут быть двоякого рода. Одни из них являются поставщиками добавочных электронов.

Такие примеси называются «донорами». Донорные уровни располагаются вблизи нижней границы зоны проводимости, и поэтому электроны легко могут переходить с этих уровней в зону проводимости, превращаясь тем самым в носителей тока (рис. 39).

Донорные примеси обеспечивают электронную проводимость. Другие примеси приводят к появлению энергетических уровней в запрещенной зоне. Эти уровни располагаются (по шкале энергии) вблизи верхнего края заполненной зоны. Вследствие тепловых возбуждений электроны из заполненной зоны переходят на эти уровни (рис. 40). Такие уровни называются акцепторными уровнями. Переход электронов из заполненной зоны на акцепторный уровень создает в заполненной зоне пустые места; их принято называть дырками. Соответствующая проводимость называется дырочной.





СТРЕМИТЕЛЕН МОЛНИИ БЕГ...

Жаркий июльский день! С утра на небе ни облачка, трудно было поверить предсказанию бюро прогнозов погоды: «Во второй половине дня дождь и гроза». Но душно, в воздухе «пáрит», и стрелка барометра заметно отклоняется влево. После полудня стали появляться облака, их становится все больше и больше. Иногда они закрывают солнце. С запада надвигается огромная туча. На высоте в несколько тысяч метров она принимает причудливую форму гриба или наковальни, еще выше можно заметить белые нити перистых облаков — скопления кристалликов льда. Это ливневое облако, ниже, к горизонту, оно сплошной свинцово-серой пеленой затянуло небо. Сомнения нет: бýдет гроза!

— Молния! А что же гром? Ага, вот и он!

Глухой, словно подземный, гул, то усиливаясь, то затихая, заставил тревожно переглянуться присутствующих.

— А все-таки гроза еще далеко! — заявил Игорь.— Вон как долго не слышно грома после молнии! Я сейчас рассчитаю и скажу, как далеко гроза. Раз, два, три, ..., девять, десять! Гром! Я считал медленно, почти по секундам, значит, гроза от нас еще на расстоянии 3,5 км. Ведь звук в воздухе распространяется со скоростью 340 м/с, а в жару, как сегодня, и еще быстрее... Опять! Раз, два, три, ..., семь, восемь! Сейчас она уже на 700 м ближе! Через несколько минут она будет здесь!

Поднявшийся ветер погнал пыль по дороге, сильным порывом захлопнул стеклянную дверь на террасу.

Вспышки молнии и удары грома, следовавшие почти непосредственно за вспышками, свидетельствовали о том, что гроза совсем близко. Вот упали первые тяжелые капли дождя. Ослепительный блеск и тотчас же страшный удар, словно небо раскололось над домом. На мгновение какая-то тишина, и затем ливень как из ведра! Опять сверкнуло! Опять похожий на взрыв удар грома!

Прошло некоторое время. Теперь между молнией и громом можно уловить промежутки, которые заметно увеличиваются. Гроза удаляется. Небо светлеет. Но долго еще не могут успокоиться дети, и разговор за столом идет о необыкновенных случаях.

— Я всегда боюсь таких гроз,— говорит хозяйка дома Мария Николаевна.— Вы не поверите, Василий Иванович, но у нас тут какое-то заколдованное место, излюбленное молниями. Вон там на повороте дороги молнии так и бьют в землю, и не было года, чтобы они не расщепили какой-нибудь столб электропередачи. И пока не починят линию, целые сутки сидим без тока.

— Думаю, что это объясняется строением подпочвенных слоев в этом месте, обеспечивающих хороший путь электрическим разрядам. Между прочим, дети, знайте, что во время грозы никогда не надо прятаться под дерево. Особенно часто поражает молния дубы. Когда я был еще мальчиком, мне подарили книгу Фламмариона «Атмосфера», в которой приводится любопытная статистика: из ста шестидесяти случаев попадания молнии в деревья, зарегистрированных автором, 54 приходится на дуб, 24 — на ясень, 10 — на ель и ни одного на березу! В книге описано много фантастических случаев с молнией. Трудно отличить в этих рассказах вымысел от истины: тут и несчастный случай с человеком, якобы сожженным дотла, причем одежда остается неповрежденной, или «воровство» монет из кармана, причем молния, похитившая их, оставляла кошелек в целости. Особенно много описано «чудес», совершенных шаровой молнией.

— А мы видели прошлым летом шаровую молнию,— перебивает рассказчика Лиля.— В грозу мы с Петей выскочили на террасу и увидели: из-за груши вдруг выплыл красноватый шар,

вроде как луна сквозь туман, и полетел вон туда, к тому дереву. Что было дальше, не знаю — мы испугались и убежали в комнаты.

— Это что! Один знакомый рассказал мне, как шаровая молния забралась к нему в комнату. Однажды ночью около 11 часов во время сильной грозы лег он в постель и заснул. Вдруг сильный удар грома заставил его проснуться. Блеснула молния, комната осветилась ослепительным светом, и сейчас же страшный удар! Попало в дом?! Нет, через мгновение снова все погрузилось в темноту. И вдруг он замечает необычное сияние и какое-то шипение около спинки кровати, где на стене установлена розетка для ночника. Он оборачивается и цепенеет от ужаса: на розетке светящийся шар (рис. 41) размером с голову ребенка. Затем шар отделяется от розетки, медленно проплывает вдоль шнура к электрической лампочке, находящейся на ночном столике. Похоже на мыльный пузырь, освещенный изнутри фосфорическим светом. Дальше шар соскакивает на столик, несколько секунд словно раздумывает, куда двинуться, наконец, скатывается с него, медленно плывет вниз и бесследно исчезает. Ни шнур, ни пол не были повреждены, но на столике осталась выжженная дорожка.

— А что такое шаровая молния, Василий Иванович?

— К сожалению, не могу точно сказать. Физики еще очень мало знают о ней. Шаровая молния — сравнительно редкое явление. На тысячу линейных молний приходится примерно одна шаровая. Рассказы «очевидцев» часто приукрашены. Но в литературе имеется описание нескольких сот достоверно зарегистрированных случаев шаровых молний. По-видимому, шаровая молния — это вторичное явление, сопровождающее, при соответствующих условиях, удар основной линейной молнии. Часто она появляется и исчезает бесследно, не причинив вреда, но были и трагические случаи при взрыве такой молнии. Продолжительность жизни шаровой молнии — от нескольких секунд до нескольких минут. Шаровые молнии бывают красноватые или белые. По-видимому, наиболее безвредны красноватые. Движутся они со скоростью несколько метров в секунду. В помещениях появляются чаще у электрических проводов и металлических предметов.

Не успел рассказчик закончить, как посыпались вопросы:

— Отчего бывает гроза? Почему зимой гроз не бывает?

— Сколько стóит, по вашему расчету, такая гроза, как сегодня? И можно ли использовать энергию молнии?

— Грозовые явления издавна интересуют людей. Еще в древней Руси калики перехожие распевали стих о «Голубиной книге», где первым вопросом было: «Откуда на земле громы пошли?»

Различают несколько видов гроз: тепловые, или летние, грозы, и фронтовые, которые бывают и зимой. Так что зимой грозы тоже бывают.

Появление гроз зимой или летом связано с образованием облаков и выпадением осадков.

Знаете, с чего началась моя работа метеоролога? В школе была устроена метеорологическая площадка, и учитель организовал кружок юных метеорологов. Мне особенно нравилось наблюдать за облаками. Я научился их фотографировать. У меня был альбом разных видов облаков.

— А облака бывают разных видов?

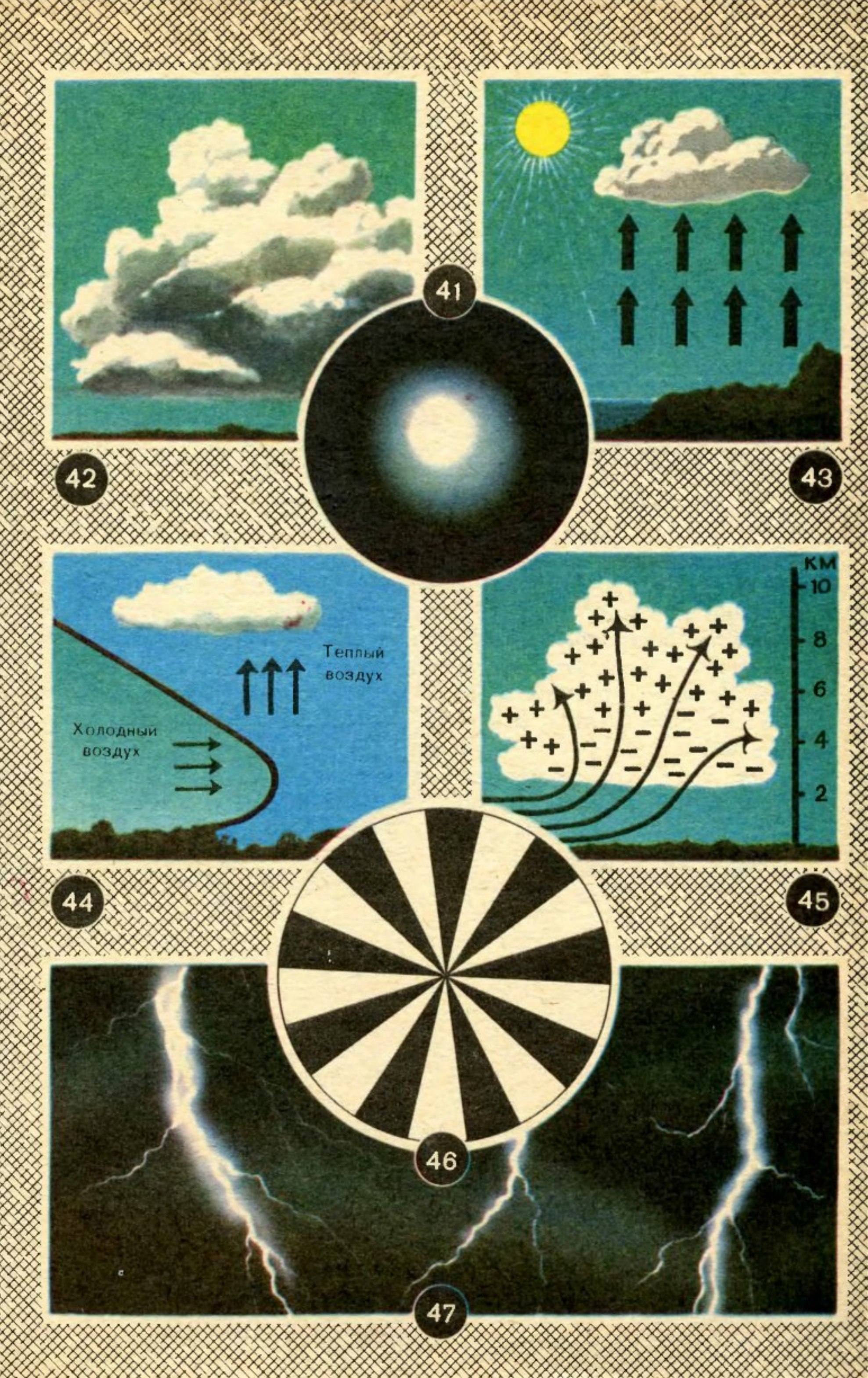
— Конечно! Чтобы убедиться в этом, не нужно особой наблюдательности. Есть низкие облака. Они бывают на высоте 2 км и ниже, это слоистые облака, придающие небу пасмурный, однообразный вид. А есть облака хорошей погоды; самые красивые — кучевые облака (рис. 42), напоминающие по форме снежные горы или сказочные воздушные замки. Они бывают только в теплое время года.

С восходом солнца поверхность почвы, трава, вода в водоемах начинают нагреваться. От соприкосновения с ними начинают нагреваться и прилегающие слои воздуха. Нагретый и ставший менее плотным воздух быстро поднимается вверх (рис. 43). В верхних, разреженных слоях атмосферы он расширяется, и так как при расширении совершается работа, то он охлаждается. При подъеме воздушные массы охлаждаются примерно на 1 °C на каждые 100 м высоты. Водяные пары, поднятые с воздухом, сгущаются в маленькие капельки. Вот и образуются на голубом чистом небе эти прекрасные облака.

— Где изучают науку об облаках, о погоде?

— Раньше в Москве был Гидрометеорологический институт, теперь он переведен в Ленинград, в Москве есть кафедра геофизики или физики атмосферы на физическом факультете университета. Но мы отвлеклись. Так вот, образование облаков и осадков имеет прямое отношение к нашей беседе.

Если подъема воздушных масс не происходит, то нет условий для возникновения грозовых облаков и грозы. В других случаях мощные восходящие потоки достигают скорости свыше 100 км/ч. В результате происходит образование грандиозных облачных скоплений, вершина которых может достигать чуть ли не 10 км. Этому особенно благоприятствует влажная, душная атмосфера в летние дни, как сегодня. Мы были свидетелями образования мощных грозовых облаков. Скорость их движения сравнительно невелика, и, кроме того, различные препятствия (например, более холодные столбы воздуха над реками или озерами) могут задерживать и ограничивать их движение. Поэтому такие грозы


41
42
43
Теплый воздух
Холодный воздух
КМ
10
8
6
4
2
44
45
46
47

часто имеют местное значение. Наиболее часто грозы наблюдаются в жарких странах. Ни в какое сравнение не идут с грозой, которую мы видели, грозы и ураганы тропических стран. В странах с умеренным климатом грозы бывают значительно реже и слабее. На Крайнем Севере гроз обычно не бывает.

Фронтовые грозы вызываются не подъемом воздушных масс в результате конвекции, а смещением их при вклинивании в теплые массы холодных, более плотных (рис. 44). Клин такого холодного фронта поднимает вверх массы теплого фронта. Движутся они растянутым фронтом с большой скоростью в направлении движения циклона. Быстрый подъем воздушных масс приводит, так же как и в случае сильной конвекции, к образованию грозовых облаков.

Это все об образовании облаков и их движении. Но причем тут электричество? Ведь молнии — это гигантские электрические искры!

Электрические явления грозы непосредственно связаны с бурно протекающим выпадением осадков. Сложные процессы трения, ударов, расщепления капелек или ледяных кристалликов на части приводят к образованию в облаках электрических зарядов. При этом положительно заряженные капельки обычно относятся воздушным потоком в верхнюю часть облака. Превращаясь в ледяные кристаллики, они образуют шапку грозового облака. На рисунке 45 дана схема наиболее часто встречающегося распределения электрических зарядов в грозовом облаке, хотя оно бывает и более сложное. Накопление в грозовом облаке больших зарядов приводит к мощным искровым разрядам как между отдельными частями облака, так и между двумя разными облаками или между облаком и поверхностью Земли. Эти разряды мы и наблюдаем в виде молний. Напряжение между облаками и землей оценивают в десятки и сотни миллионов вольт. Длина искры достигает 10 км. Молнии предшествует появление слабосветящегося канала, распространяющегося в направлении к земле. Когда канал достигнет земли, по нему устремляется главный разряд молнии со скоростью в десятки тысяч километров в секунду. Таким образом, продолжительность молнии около 0,001 с. Поэтому если вам когда-нибудь случится наблюдать движение пешеходов и автомашин ночью в грозу, при свете молнии, то вам представится поразительная картина. Движение как бы прекратилось, колеса неподвижны. Пешеходы как бы застыли в той позе, в какой их застал блеск молнии. Слабосветящийся канал, предшествующий молнии, представляет собой скопления ионизованных частиц. В воздухе всегда имеется некоторое количество таких частиц. Под влиянием сильного электрического поля между облаком и землей число частиц ла-

винообразно нарастает. При расщеплении молекул в процессе образования новых ионов возникают излучения, распространяющиеся со скоростью света. Эти излучения вызывают новые расщепления и появление новых лавин. Прежде образовавшиеся лавины нагоняют их и сливаются с ними в еле светящийся электропроводящий канал, по которому и устремляется мощный поток электронов — главный разряд молнии. Его скорость порядка десятков тысяч километров в секунду. Сила тока измеряется десятками и сотнями тысяч ампер.

Стремителен молнии бег,
И разит она тяжким ударом!

— Откуда это? И как можно измерить скорость молнии?!

— Это из поэмы «О природе вещей» римского поэта Лукреция. А для определения силы тока молнии и для того, чтобы проследить ее развитие, используют метод высокоскоростного фотографирования с помощью специальной быстро вращающейся камеры. При этом на пластинке получается не одна, а несколько молний, снятых в различные моменты развития молнии. Отсюда можно сделать расчеты. Впрочем, в книге Фламмариона, о которой я вам говорил, имеется полезный совет, следуя которому можно самым простым способом определить быстроту проскакивания молнии. Нужно взять картонный кружок, разделенный на секторы, попеременно черные и белые (рис. 46). Этот кружок можно вращать вокруг оси с той или иной скоростью. Известно, что глаз сохраняет световые впечатления в течение $^1/_{10}$ секунды. Поэтому если мы будем вращать в темноте раскаленный уголь, совершая по десять или более полных оборотов в секунду, то увидим сплошной светящийся круг. Вращая с такой же скоростью картонный кружок, мы не в состоянии будем различать отдельные секторы, а увидим сплошное серое поле. Но кружку можно сообщить вращение в десять и в сто раз более быстрое. При этом если он будет освещаться только молнией, то именно быстротой вращения мы можем измерять время вспышки молнии. Если круг делает 10 об/с и при блеске молнии он представляется нам неподвижным (мы различаем отдельные секторы), то это значит, что вспышка продолжалась менее одной десятой секунды, а если он кажется неподвижным только при 100 об/с, то, значит, молния проскакивает менее чем в одну сотую секунды, и т. д. Попробуйте сделать такие измерения. Что же касается фотографирования молний, то оно удается и с самым обыкновенным, неподвижным фотоаппаратом. Надо во время ночной грозы направить аппарат на ту часть неба, где чаще сверкают молнии, и подождать. Как только блеснет молния, закрывайте объектив, быть может, вам посчастливилось поймать

молнию. Не думайте, что на фотографии она будет выглядеть в виде зигзага, какой ее изображают на плакатах по технике безопасности. Нет, фотография молнии похожа на изображение реки на географической карте, с многочисленными притоками и разветвлениями (рис. 47). Это линейный, или ленточный, вид молнии, но бывают и другие молнии: расплывчатые, шаровые. Расплывчатые молнии не сопровождаются громом. Их называют зарницами, хотя правильнее называть зарницей отблеск, отражение от воздушных слоев очень отдаленных молний, гром которых до нас не доходит.

— Чем объясняется гром? Сегодня, когда гроза была далеко, были продолжительные глухие раскаты, а когда над нами, то раскатов не было, а был только страшный удар. Почему?

— Обычно считают, что гром — это звук, вызванный расширением воздушных масс, окружающих канал молнии, а раскаты происходят вследствие многократного отражения звука от воздушных слоев разной плотности. В действительности дело обстоит сложнее. Кроме звуковых волн, во время разряда молнии возникают также и взрывные волны, образующиеся за счет ряда взрывов по пути молнии. Взрывные волны распространяются со скоростью, большей звуковой, и воспринимаются как удар. Взрывные волны от далеких молний доходят до нас сложным путем, то усиливаясь, то угасая.

В заключение отвечу на вопрос, «сколько сто́ит» сегодняшняя гроза. Расчет, конечно, сделаем очень приблизительный. Гроза, которую мы пережили, была не из очень сильных. Число молний над ближайшей местностью примем за сто. Электроэнергия, как известно, подсчитывается так: электрическая энергия=сила тока×напряжение×время.

Силу тока в нашем случае можно принять равной 10 000 А, напряжение — 10 000 000 В, продолжительность молнии —0,001 с. Подставляем эти данные в расчетную формулу: электрическая энергия=10 000 А·10 000 000 В·0,001 с=100 000 000 Вт·с, это приблизительно 30 кВт·ч. При тарифе 4 к. за 1 кВт·ч одна молния обходится в 1 р. 20 к. (120 р. за сотню!).

Об использовании этой энергии пока речи нет. Отдельные попытки соорудить антенные установки для улавливания атмосферного электричества развития не получили. Непостоянство местных значений силы тока, напряжения и длительности молнии сводит на нет роль местных грозовых станций. Однако статистика утверждает, что на всем земном шаре одновременно происходит 1800 гроз и что около 100 молний сверкают каждую секунду. Это дает большую мощность:

$$10^4\ \text{А} \cdot 10^7\ \text{В} \cdot 10^2! = 10^{13}\ \text{Вт} = 10^{10}\ \text{кВт}!$$

Организация огромной единой сети грозовых станций, может быть, заинтересует инженеров в будущем. Пока же люди больше внимания уделяют не использованию, а защите от вредных последствий гроз. Я не буду задерживаться на этом вопросе. Хочу только предупредить и предостеречь вас от ошибки, которую часто допускают в объяснении роли действия молниеотвода. Утверждают, что молниеотвод принимает на себя и отводит в землю грозовые разряды. В исключительных случаях это возможно, но все же основное назначение молниеотвода не принимать на себя удар, а не допускать, чтобы такой удар произошел. Это достигается тем, что с острия молниеотвода происходит тихий разряд. При этом напряженность электрического поля в некотором объеме пространства вокруг молниеотвода уменьшается, вследствие чего уменьшается и вероятность удара молнии.

ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

ПЛАЗМА

Четвертое состояние?! Нет, это не ошибка. Число состояний, в которых может быть вещество, не ограничивается тремя. Еще Фарадей 140 лет назад говорил об особом, отличном от обычного состоянии — об «электротоническом», т. е. электровозбужденном состоянии материи, а в 1879 г. английский физик Крукс озаглавил свой доклад так: «О лучистой материи, или Четвертом состоянии материи». Еще за две тысячи лет до нас глубокий аналитический ум древнегреческих мудрецов-философов, стремившихся свести все разнообразие мира к немногим основным началам, тоже не удовлетворялся тремя стихиями и к трем началам — «земля» (твердое), «вода» (жидкое), «воздух» (газообразное) — добавил четвертое — «огонь». Разумеется, этот огонь Аристотеля так же или даже более далек от плазмы современного физика, как атомы Демокрита от атомов Резерфорда и Бора.

Что же такое плазма? Плазма — это ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают. Свойства плазмы настолько отличаются от обычных газов, что вполне заслуженно физики относят ее к особому, четвертому, состоянию вещества. Где и при каких условиях возникает это состояние? От примитивного костра до атомного реактора, от искры, которую можно извлекать из потертой о волосы гребенки, до молнии, от разноцветных рекламных трубок и ламп дневного света до сверкающих солнц и космических туманностей — вот многообразные и многочисленные случаи плазменного состояния вещества. В качестве примера на рисунке 48 показаны электрический разряд и электрическая дуга.

Можно сказать, что в состоянии плазмы находится подавляющая часть вещества Вселенной. Например, все планеты нашей Солнечной системы имеют общую массу, меньшую 0,002 части массы Солнца. Следовательно, на долю плазмы приходится более 99% массы всей Солнечной системы. Каковы свойства плазмы, заставляющие отличать ее от газообразного состояния?

Как известно, газ является плохим проводником электричества. Заряженный электроскоп, находящийся в сухом воздухе, остается очень долго в заряженном состоянии. В месте разрыва электрической цепи через воздушный промежуток ток не проходит. Неизолированные медные провода при небольшом напряжении передают электрическую энергию без утечки.

Чтобы среда могла проводить электрический ток, необходимы носители электрических зарядов: в металлах это электроны, в жидкости — положительные и отрицательные ионы, образующиеся в результате электролитической диссоциации. Чтобы газ сделать проводящим, необходимо вызвать расщепление его молекул и атомов на ионы и электроны. Ионизация газа может быть вызвана нагреванием, ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами, а также излучением от радиоактивных веществ.

Очень эффектны опыты со свечением трубок Гейслера (фамилия стеклодува, прославившегося изготовлением трубок причудливой, сложной формы). В трубках находится разреженный газ. Под действием высокого напряжения газ в трубках светится красивым сиянием. В зависимости от природы газа цвет сияния различен: в воздухе оно фиолетовое, в водороде — розовое, в углекислом газе — зеленое.

В школе демонстрируется опыт, показывающий ступени развития электрического разряда по мере разрежения газа в трубке. Для опыта берется стеклянная трубка длиной 40—50 см, с обоих концов которой впаяны электроды. К электродам подводится высокое напряжение. Трубка присоединяется при помощи толстого резинового шланга к воздушному насосу и из нее откачивается воздух. Пока воздух в трубке находится под нормальным атмосферным давлением, разряда практически нет. Происходит лишь слабый тихий разряд с образованием короны (слабосветящихся кисточек) у электродов. Давление по мере откачивания воздуха из трубки падает. Примерно при давлении 40 мм рт. ст. от одного электрода к другому начинают пробегать светящиеся фиолетовые нити, которые при дальнейшем разрежении воздуха утолщаются в яркие жгутики, затем ленты, пока, наконец, вся трубка не заполняется удивительным фиолетовым сиянием.

При большей степени разрежения светящийся столб распадается на ряд полос (стратов). (Более мощные насосы могут

привести в дальнейшем к исчезновению свечения газа, но этого явления мы касаться не будем.)

При внимательном рассматривании свечения в темноте можно заметить, что между розово-фиолетовым светящимся столбом, идущим от положительного электрода (положительный столб), и голубоватым сиянием, окружающим катод, имеется темное пространство (рис. 49). Положительный столб занимает бо́льшую часть трубки. Американский физик Ленгмюр предложил в 1924 г. для положительного столба название «плазма».

Объяснение физических процессов, происходящих в газоразрядной трубке, сводится к следующему. В воздухе, заполняющем трубку, всегда найдется хотя бы один положительный ион (например, как следствие космической радиации). Под действием электрического поля он устремляется к катоду и выбивает из него электрон. Последний, ускоряясь электрическим полем, приобретает большую энергию, и при столкновении электрона с нейтральной молекулой образуется новый электрон и положительный ион. Образующиеся таким образом электроны при достаточном разрежении газа в трубке могут развить во время свободного пробега достаточно большую скорость и будут в состоянии разбить новые молекулы. Число ионов и электронов лавинообразно нарастает. Ударяясь о нейтральные молекулы и атомы, они приводят их в возбужденное состояние. Это значит, что электроны атомов перескакивают на более удаленные от ядра орбиты, запасая в себе дополнительную потенциальную энергию. При возвращении на основную орбиту электроны отдают эту энергию в виде энергии излучения (свечение). На рисунке 49 (внизу) показано распределение плотности положительных и отрицательных зарядов по длине трубки. Оно определяется с помощью зондов, впаянных в различных местах трубки. В положительном столбе находятся примерно равные количества положительных и отрицательных носителей зарядов, и поэтому плазма электрически нейтральна. Это характерное свойство плазмы отличает ее от других участков газа в трубке.

Спектральные исследования плазмы позволяют сделать заключение и о ее структуре. Оказалось, что в плазме газового разряда скорости теплового движения электронов и ионов, а также нейтральных атомов резко различны. Наибольшую скорость хаотического движения в газоразрядной трубке имеют электроны. Масса электронов в тысячи и десятки тысяч раз меньше массы атома или иона, поэтому при столкновении с ионами или нейтральными атомами электроны почти не изменяют своей кинетической энергии (согласно законам механики при упругих соударениях очень легких тел с массивными почти не происходит обмена энергии). Электроны отлетают от атомов или

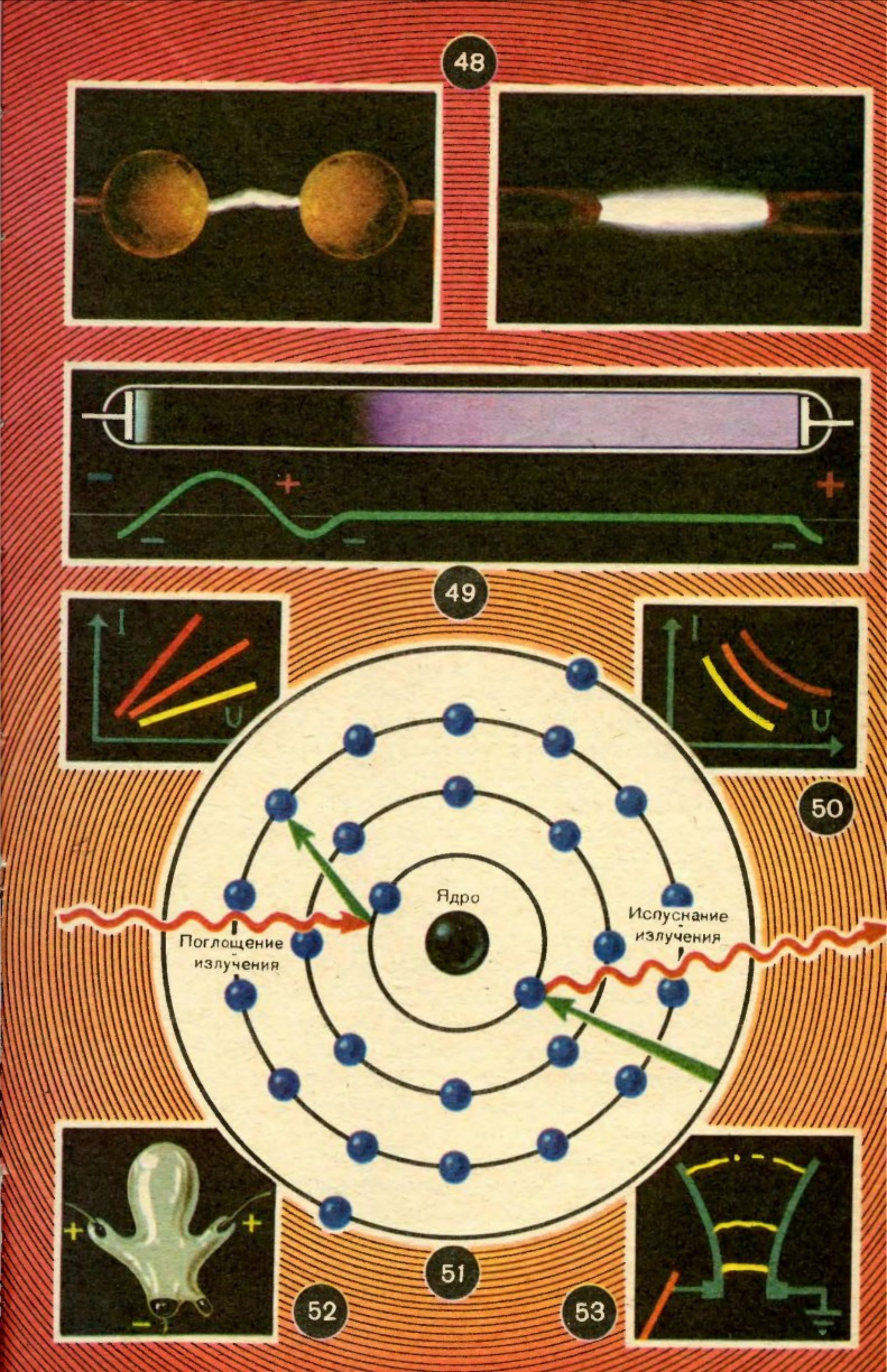
ионов, подобно тому как отлетел бы маленький резиновый мячик от массивного чугунного ядра, не изменив ни скорости, ни направления движения ядра. Это обстоятельство позволяет говорить о собственной огромной температуре электронного газа плазмы. Несмотря на холодное свечение газосветной трубки, температура электронного газа достигает сотен тысяч градусов. Такая газоразрядная плазма ввиду неоднородности температур ее составных частей получила название неизотермической.

Несколько иначе обстоит дело, когда электрический разряд происходит в газе под давлением, равным атмосферному или больше. Пламя электрической дуги, пламя в дуговых ртутных лампах высокого давления имеет температуру от 3500 °C до нескольких десятков тысяч градусов. Температура ствола молнии, измеренная спектроскопически, оказалась равной 30 000—35 000 °C. Разница температур электронного и ионного газов здесь не так велика.

Плазма может образоваться не только при электрическом разряде в газе. Она образуется и при сильном нагревании газа. Из плазмы состоят недра звезд. Причем такая плазма отличается от газоразрядной тем, что в ней температуры электронного и ионного газов одинаковы. Такого вида плазма называется изотермической.

Плазма по физическим свойствам отличается от газа. Она обладает хорошей электропроводностью и теплопроводностью. Однако если сравнить электропроводность плазмы с электропроводностью металлов, то обнаружится их резкое различие. Как известно, для металлов зависимость силы тока от напряжения выражается законом Ома. Сила тока в данном металлическом проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению (рис. 50, слева). Крутизна графика характеризует сопротивление проводника. С повышением температуры крутизна возрастает — сопротивление металлов увеличивается, так как колебания ионов в узлах кристаллической решетки затрудняют движение электронов.

Для плазмы закон Ома большей частью неприменим. Характеристика плазмы (график зависимости силы тока от напряжения) не прямая линия, а падающая кривая (рис. 50, справа). С ростом температуры и при увеличении силы тока увеличивается число электронов в плазме, а поэтому напряжение, необходимое для разряда, уменьшается. Уменьшение сопротивления плазмы может привести к опасному возрастанию силы тока, поэтому к плазме последовательно подключают добавочный «балластный» резистор. В этом отношении свойства плазмы сходны со свойствами полупроводников. У полупроводников сопротивление, так же как и у плазмы, тем больше, чем ниже температура.


48
49
I
U
I
U
50
Ядро
Поглощение излучения
Испускание излучения
51
52
53

Интересны свойства плазмы при температуре в миллионы градусов («горячая плазма»). Такая плазма почти не оказывает сопротивления электрическому току. Ученые работают сейчас над созданием электродвигателей и генераторов электрической энергии, в которых вместо металлических проводов можно было бы использовать легкоподвижную плазму, обладающую ничтожным сопротивлением.

Важнейшей проблемой современной физики является проблема управления плазмой, проблема удержания плазмы в устойчивом состоянии. Неизотермическая плазма может сохраняться лишь при наличии электрического поля. Напротив, изотермическая плазма устойчива. Возникает вопрос, как и в каком сосуде удержать вещество с температурой в сотни тысяч и миллионы градусов. Казалось бы, задача принципиально неразрешима, так как любое вещество переходит при такой температуре в состояние плазмы. Между тем решение нашлось. Оказалось, что плазма может быть «подвешенной» в магнитном поле внутри вакуумированной камеры таким образом, чтобы не касаться ее стенок.

Каково же значение плазмы в нашей жизни? Где она используется?

Пройдитесь вечером по улицам города. Всюду вам будут попадаться лампы дневного света. Такие лампы сейчас освещают лаборатории, цеха фабрик и заводов, внутренние помещения магазинов, станции метро и жилые дома. Их свет приближается к дневному, а КПД достигает 20—30%, что в 8 раз превышает КПД ламп накаливания. Лампа дневного света представляет собой стеклянную трубку, стенки которой изнутри покрыты люминофорами — люминесцирующими веществами, светящимися под действием ультрафиолетовых лучей. Такими лучами богат свет паров ртути, наполняющих трубку. Процесс люминесценции может быть пояснен следующей схемой. Ультрафиолетовое излучение возбуждает атом люминофора, т. е. переводит его внешние электроны на более высокие энергетические уровни (в модели атома Резерфорда—Бора этим уровням соответствуют более удаленные от атомного ядра орбиты). При возвращении атома в исходное состояние электрон отдает запасенную потенциальную энергию (энергию возбуждения) в виде светового излучения (рис. 51).

Идея практического применения электрического разряда для целей искусственного освещения была предложена русским академиком В. В. Петровым. На самой заре развития учения об электрическом токе он первый открыл возможность электрического освещения. Электрическая дуга, или дуга Петрова, представляет собой не что иное, как плазменный электрический раз-

ряд при атмосферном давлении. В. В. Петров присоединил провода от огромной, построенной им гальванической батареи к двум древесным углям, расположенным на расстоянии 0,25—0,75 см друг от друга на скамеечке со стеклянными ножками; между ними появился «весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может». В современном исполнении электрическая дуга образуется между двумя угольными стержнями, приводимыми сначала в соприкосновение и удерживаемыми автоматическим или ручным регулятором на постоянном небольшом расстоянии. Свечение исходит главным образом от положительного угля (анода), раскаляемого в пламени дуги добела. Плазма в этом случае лишь нагревает анод. Температура электрической дуги превышает 3000 °С. Мысль о возможности применить высокую температуру дуги для плавления металлов также была высказана В. В. Петровым.

Однако от его гениальной мысли до ее практического осуществления и внедрения в жизнь прошло несколько десятков лет. Лишь в 1876 г. русский инженер П. Н. Яблочков взял патент на свое изобретение, остроумно разрешавшее проблему регулировки электрической дуги. «Вместо того чтобы автоматически сближать угли по мере их сгорания, я помещаю угли рядом друг против друга, разделяя их изолирующим веществом, могущим сгорать вместе с углем, например каолином». «Русский свет» — так называли освещение улиц, площадей, театров Парижа и Лондона свечами Яблочкова. Впоследствии этот вид освещения был вытеснен лампами накаливания, изобретенными русским электротехником А. Н. Лодыгиным.

Целая плеяда русских ученых и инженеров украшает историю электротехники. Имена Яблочкова, Чиколева, Бенардоса, Славянова, Патона, Лазаренко связаны с блестящими открытиями и усовершенствованиями в области электрического освещения, электросварки, электроискровой обработки металлов.

Электрическая сварка в настоящее время широко применяется при прокладке рельсов, при сооружении каркасов промышленных и жилых зданий, в котлостроении. Она является основным способом соединения частей металлических конструкций и почти вытеснила клепку. Тепловое действие электрической дуги используется также в дуговых печах для выплавки стали и цветных металлов. Температура между электродами таких печей достигает 6000—8000 °С. Специальные стали — инструментальная, нержавеющая, жаропрочная — выплавляются только в электрических печах. В электрических печах проводятся многие процессы химической технологии. Назовем хотя бы получение

карбидов: карбида кальция — исходного вещества при получении ацетилена и карбида кремния (карборунда), применяемого для изготовления наждачных шлифовальных камней, наждачного порошка.

Электрическую дугу можно получать не только между угольными, но и между ртутными электродами. Ртутные дуговые лампы в кварцевых баллонах находят широкое применение в медицине («горное солнце»). Пламя электрической дуги богато ультрафиолетовыми лучами, оказывающими сильное физиологическое воздействие.

Огромное значение в электротехнике имеют ртутные выпрямители тока. Электрифицированные железные дороги, трамвай, метрополитен получают постоянный ток с подстанций, на которых установлены мощные ртутные выпрямители. На рисунке 52 изображен ртутный выпрямитель. В стеклянную колбу впаяны два стальных или графитовых электрода, являющихся анодами выпрямителя. В нижнюю часть колбы налита ртуть — это катод. Снизу в ртуть введен металлический стержень. Рядом с катодом в колбе имеется углубление, заполненное ртутью и предназначенное для зажигания дуги разряда в колбе. Для этого колбу немного наклоняют, и тогда ртуть, соединяясь, замыкает цепь. При возвращении колбы в первоначальное положение ртутный контакт размыкается и между ртутными электродами вспыхивает дуга. При этом на ртути катода появляется небольшое светлое пятно, раскаленное до 3000 °C. При столь высокой температуре из ртути вылетают электроны, устремляющиеся к тому из основных графитовых анодов, который в данный момент имеет положительный знак. Между ртутью и графитовым анодом образуется электропроводящий мост из плазмы. Он пропускает интенсивный поток электронов поочередно то к одному, то к другому аноду в зависимости от направления тока в обмотке питающего трансформатора. Положительные ионы, образующиеся при столкновениях электронов с нейтральными молекулами, летят обратно к катоду и, бомбардируя его, поддерживают температуру бегающего по поверхности ртути катодного пятна на необходимом высоком уровне. Для получения более сглаженных пульсаций выпрямленного тока применяют колбы не с двумя, а с большим числом анодов. Мощные металлические ртутные выпрямители, хотя по внешнему виду и непохожи на выпрямители со стеклянными колбами, основаны на том же принципе.

Высокая электропроводность плазмы доставляет большие неприятности электротехникам при включении и выключении сильных токов, особенно если цепь содержит индуктивную нагрузку (моторы, трансформаторы). Резкий скачок напряжения в момент размыкания цепей приводит к образованию электриче-

ской дуги между контактами рубильника. Кроме того, что дуга портит, сжигает контакты, пламя дуги может переброситься на соседний контакт, что будет равносильно короткому замыканию. Поэтому для замыкания и размыкания цепей напряжением больше 250 В не применяются обычные рубильники, а применяются масляные выключатели, где разрыв цепи происходит внутри сосуда с минеральным маслом и возникающая дуга гаснет в атмосфере пузыря образующихся паров и газов.

Для защиты проводов от перенапряжений и удара молнии во время грозы полезно применять электрическую дугу. С этой целью используют молниеотводы в форме рогов. Один из них соединен с токонесущим проводом, другой — с землей. В случае удара молнии или перенапряжения в проводах в узком месте разрядника возникает электрическая дуга. Вследствие нагревания воздуха она отгоняется вверх, растягивается все больше и больше и, наконец, разрывается и гаснет (рис. 53).

Температура электрической дуги, горящей при нормальном атмосферном давлении, как известно, равна 3500 °С. Но, зажигая дугу под давлением, удалось получить температуру 7000 °С и выше, т. е. температуру бо́льшую, чем на поверхности Солнца. И по яркости свечения удалось превзойти яркость нашего дневного светила. В два раза ярче Солнца ослепительные вспышки дуги в атмосфере газа ксенона. Эти яркие вспышки используются фотографами для моментальных съемок.

Солнце — одна из бесчисленных звезд. Оно не относится к типу наиболее ярких или наиболее горячих звезд. Наше Солнце — желтая карликовая звезда. Значительно выше температура белых звезд, например звезды Сириус, температура которой достигает 10 000 °С. И это на поверхности! О поверхностной температуре звезд судят по яркости спектральных линий. Внутри звезд, как это показывают довольно сложные расчеты, температура достигает десятков и сотен миллионов градусов. При этих чудовищных температурах в плазме происходят реакции между ядрами атомов вещества с выделением колоссальной энергии.

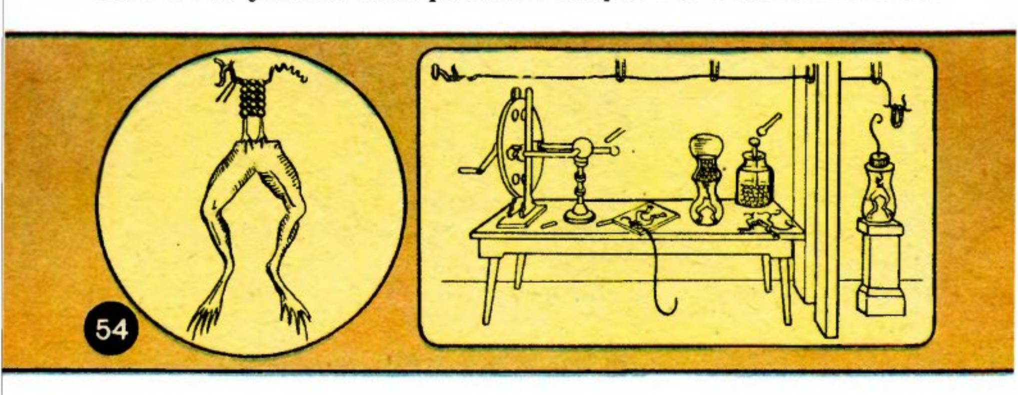
СТАРОЕ И НОВОЕ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ И БАТАРЕЯХ

История гальванических элементов началась с того, что в один из ноябрьских дней 1770 г. профессор анатомии и физиологии Болонского университета Луиджи Гальвани был поражен странным явлением: находившиеся на столе обезглавленные лягушки, над которыми профессор производил опыты, вздрагивали. Их лапки судорожно сокращались всякий раз, когда из электриче-

ской машины извлекали яркие искры. Особенно сильны стали содрогания лапок, когда к ним были присоединены проволоки, свисавшие до земли (рис. 54). Что бы это могло означать? Сейчас бы мы ответили: «Радиоприем!» При разряде электрической машины возникали электромагнитные волны. Усиление эффекта при заземлении — лишнее доказательство этому. Каждому радиолюбителю известно, как усиливается прием при заземлении радиоприемника. Но в те далекие времена никто и понятия не имел ни о радиоприемниках, ни об электромагнитных волнах...

Опыты с «оживлением» лягушек вызвали сенсацию. Оживление после смерти! Физиологи думали, что им удалось воочию уловить их сон о жизненной силе, врачам казалось, что нет уже невозможного исцеления.

В дальнейшем Гальвани наблюдал сокращения мышц у лягушек и без участия электрической искры. Он соединял металли-



ческой проволокой мышцы лапки и обнаженные нервы спины лягушки. Особенно сильное сокращение мышц наблюдалось, когда соединяющая проволока оказывалась состоящей из двух металлов — меди и цинка. Гальвани был физиологом, а не физиком, поэтому он видел причину явления в некоем «животном электричестве», различном в мускулах и нервах. Он уподоблял опыт с лягушкой опыту с лейденской банкой, которая разряжалась при соединении внешней и внутренней обкладок проволокой. Свою теорию о «животном электричестве» Гальвани подтверждал ссылкой на известные случаи разрядов, которые способны производить некоторые живые существа — электрические рыбы (например, суринамский угорь, электрический скат в Средиземном море, электрический сом в водах Нила).

Опыты Гальвани очень заинтересовали его соотечественника, физика Алессандро Вольта. «Признаюсь,— писал он,— я с неверием и очень малой надеждой на успех приступил к первым опытам: так невероятными казались они мне, такими далекими

от всего, что нам доселе известно было об электричестве... Ныне я сам производил чудное действие и от неверия перешел, может быть, к фанатизму». На первых порах Вольта разделял точку зрения Гальвани относительно «животного электричества», но последующие многочисленные опыты показали физическую природу источника тока; они привели к созданию первого гальванического элемента.

Простейший элемент, известный в учебниках под названием элемента Вольта, можно сделать так. Надо взять стакан, налить в него водный раствор серной кислоты (или крепкого раствора уксуса, или раствора нашатыря, или, наконец, поваренной соли) и опустить в раствор медную и цинковую пластинки, причем пластинки не должны касаться друг друга (рис. 55). Вам теперь понятно, что и в опыте Гальвани был такой же элемент, только роль соответствующих растворов выполняли жидкости в тканях лягушки.

Какое же физическое объяснение дал наблюдавшемуся явлению Вольта? Вместо теории «животного электричества» он выдвинул теорию «металлического электричества». Он видел источник электрического тока в соприкосновении двух разных металлов. Вольта доказывал это при помощи опыта с электроскопом (рис. 56). Наложенные друг на друга цинковая и медная пластинки при разнимании оказываются наэлектризованными. Испытывая различные металлы, он установил так называемый Вольтов ряд: +цинк, олово, свинец, железо, латунь, бронза, медь, платина, золото, серебро—. Напряжение, возникающее при соприкосновении двух каких-либо металлов, тем больше, чем дальше отстают они друг от друга в этом ряду. При этом Вольта установил, что если составить цепь из всех перечисленных (или части) металлов в указанном порядке, то напряжение на концах ряда цинк — серебро будет такое же, как при непосредственном соприкосновении цинка и серебра.

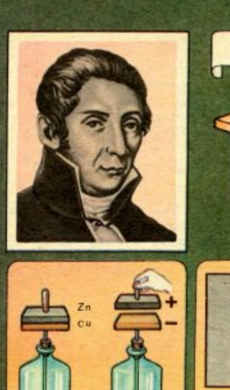
Явление возникновения разности потенциалов при соприкосновении разнородных металлов (это явление называется контактной разностью потенциалов) имеет большое значение в современной электронике. Оно объясняется как следствие диффузии электронов. В месте соприкосновения двух разнородных металлов электроны переходят через границу контактного слоя (рис. 57). Они переходят преимущественно из того металла, где их связь с решеткой металла слабее, в тот, где эта связь сильнее.

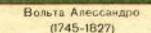
Таким образом, открытие Вольта не объясняет действие гальванического элемента. Это видно хотя бы из того, что в элементе Вольта цинковая пластинка является не положительным (как в опыте с электроскопом), а отрицательным электродом, положи-

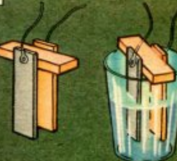
тельным служит медь. Вольта рассматривал построенную им батарею — вольтов столб — как соединение многих медно-цинковых пар, а суконные или картонные прокладки, по его мнению, лишь отделяли в этом столбе один элемент от другого, не мешая в то же время прохождению тока. В действительности надо было учесть и роль разделяющего металлы раствора. Элементарной ячейкой в вольтовом столбе была комбинация медного и цинкового кружков вместе с влажной прокладкой. Эти элементы, наложенные друг на друга так, как показано на рисунке 58, оказывались соединенными последовательно, что и обеспечивало сильное действие всей батареи. Можно самому изготовить вольтов столб из стопки медных трехкопеечных монет и цинковых кружков соответствующего диаметра, переложив их картонными прокладками, смоченными в растворе нашатыря. Это было бы хорошей иллюстрацией к докладу на историческую тему об элементах.

Объяснение действия элемента Вольта таково. Как известно, в металлах валентные электроны перемещаются между узлами кристаллической решетки. При этом металл не оказывается заряженным отрицательно, так как общий заряд электронов уравновешивается общим положительным зарядом ионов. Если опустить металлическую пластинку в водный раствор, например, серной кислоты, то металл начнет растворяться. Положительные ионы металла Zn^{+2} или Cu^{+2} переходят в раствор, и тогда металл оказывается заряженным отрицательно. Если взять в качестве второго электрода нерастворяющийся в электролите уголь, то стрелка гальванометра (магнитоэлектрической системы) будет отклоняться в одну и ту же сторону, какой бы металл мы ни взяли в паре с ним. Различие только в том, как сильно отклонится стрелка. Применяя цинк, мы получим наибольшее отклонение, медь даст более слабое отклонение (рис. 59), а свинец еще более слабое. Это объясняется различной растворимостью металлов.

Если в угле-медном элементе, дававшем сравнительно небольшое отклонение стрелки гальванометра вправо, заменить угольный электрод цинком, то получим отклонение стрелки в левую сторону, причем значительно большее (см. рис. 59). Медная пластинка стала теперь положительным полюсом, цинковая, как и раньше, отрицательным. Как это объяснить? Ведь мы видели, что при растворении в электролите оба металла заряжаются отрицательно. Объясняется это различной растворимостью металлов. Если оба электрода цинковые, то они обладают одинаковой растворимостью и никакой разности потенциалов между электродами не возникает. Если взять в качестве электродов медь и свинец, то медь оказывается отрицательным полюсом. Неверно истолковав природу явлений, первые исследователи галь-




Вольта Алессандро
(1745-1827)


55


Zn
Cu
+
−
56


Электроны
Ионы
57


−
+
58




C
Zn




C
Cu



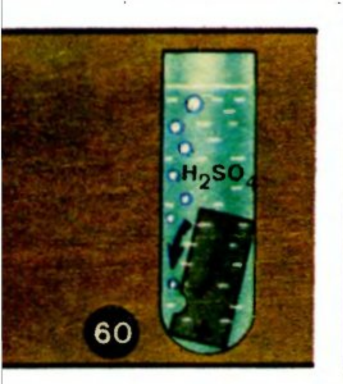

Zn
Cu
59

ванического тока были поражены быстрым расходованием цинка в элементах и батареях. Им казалось, что это только неприятное побочное явление, с которым надо бороться, и, как только будет найдено противодействие, все окажется в порядке. Недоразумение разрешилось, когда была установлена связь этого явления с законом сохранения энергии: расход цинка в элементе так же неизбежен, как расход горючего в двигателе.

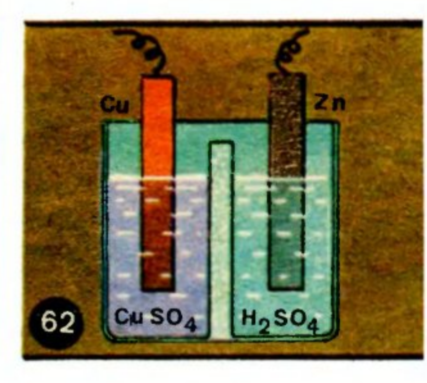
Еще об одном важном явлении. В элементе Вольта протекает химическая реакция:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2\uparrow.$$

Образующийся сульфат цинка остается в водном растворе, а пузырьки водорода выделяются на меди. Такое явление, казалось, противоречило известному факту, что пузырьки водорода выделяются на цинке при погружении его в серную кислоту







(один из способов получения водорода в химических лабораториях). Однако никакого противоречия нет. Причина выделения водорода в обоих случаях одна и та же. Установлено: 1) химически чистый цинк не растворяется в разбавленной серной кислоте; 2) технический цинк растворяется, причем пузырьки газа поднимаются от определенных точек; 3) эти точки оказываются вкрапленными в цинк примесями меди или угля. Цинк, опущенный в раствор серной кислоты, может рассматриваться как гальванический элемент. Ток, идущий в направлении, указанном стрелками на рисунке 60, приводит к электролизу серной кислоты с выделением водорода. Чтобы предотвратить образование таких паразитных элементов в техническом цинке (когда его применяют для электродов в элементах), цинк амальгамируют, т. е. натирают ртутью. Ртуть, растворяя цинк, образует амальгаму, под которой и скрываются посторонние вкрапления. Амальгамированный цинк в кислоте не растворяется, пока не будет замкнута цепь тока.

Выделение пузырьков водорода на медной или угольной пластинке во время работы элемента явление неприятное. Дело не в том, что выделяющийся водород покрывает анод элемента и тем увеличивает его внутреннее сопротивление, а в том, что с выделением водорода происходит наслоение на медно-цинковом элементе другого элемента с водородом в качестве отрицательного полюса. Отрицательного? Новая задача для читателя, знакомого с химией. Ведь ионы водорода несут положительный заряд, почему же, покрывая медь, водород становится отрицательным полюсом? Дело в том, что на меди осаждаются не ионы, а нейтральные атомы и молекулы водорода. Поэтому обратный переход ионов водорода в раствор вызывает появление ЭДС, включенной навстречу первоначальной ЭДС элемента. Появление противоположных полюсов на электродах элемента называется поляризацией элемента. Она и явилась причиной того, что элемент Вольта давно перестал применяться на практике.

Если удалить пузырьки водорода с медной пластинки, элемент можно повторно использовать. Для удаления водорода было предложено множество различных способов, начиная от постукивания по аноду элемента. Вполне естественно, что наиболее удачными оказались химические способы деполяризации (устранения поляризации) путем добавления специальных окислителей, не допускающих образования водорода на аноде. Все эти системы гальванических элементов, число которых превышает несколько десятков, отошли в область предания. Лишь немногие из них (элементы Даниэля, Грене) сохранились в некоторых физических кабинетах учебных заведений. Элемент Грене знаком, вероятно, и нашим читателям (рис. 61). Деполяризатором служит сильно окисляющий раствор бихромата калия или натрия в серной кислоте. Если вам приходится иметь дело с таким элементом, то не забывайте по прекращении работы вынимать из раствора цинковый электрод. Хромовая жидкость столь сильный окислитель, что здесь не помогает даже амальгамирование цинка. Интересны элементы с двумя жидкостями: они отличаются стабильной ЭДС. В качестве примера такого элемента укажем элемент Даниэля (рис. 62). Сосуд разделен на две половины пористой перегородкой. В одну половину налит раствор медного купороса, в другую — водный раствор серной кислоты. В медный купорос опущен медный электрод, в серную кислоту — цинковый. Роль перегородки состоит в том, чтобы не допускать смешивания жидкостей и подхода медного купороса к цинку, иначе произойдет химическая реакция двойного обмена и медь начнет осаждаться на цинке.

Посмотрим, что происходит на пластинках каждого «полу-

элемента» (рис. 63). Если цепь разомкнута, то на том и другом электродах устанавливается электрическое равновесие. Ионы меди могут переходить в раствор из металла, но, с другой стороны, и из раствора медного купороса ионы меди могут осаждаться на электроде. Ни того ни другого не происходит. Начавшееся осаждение ионов из раствора на электрод создает избыток положительных зарядов, а в электролите — избыток отрицательных ионов. Образуется тончайший слой (двойной слой) наподобие обкладок заряженного конденсатора, напряженность электрического поля которого направлена от электрода в раствор. Это поле и прекратит дальнейшее осаждение ионов меди из раствора. Ионы же металла электрода не будут переходить в раствор из-за противодействия электрического поля двойного слоя.

На другом «полуэлементе» картина иная. Переход в раствор кислоты ионов цинка сопровождается обеднением электрода положительными зарядами, вследствие чего на границе его с раствором образуется отрицательный слой, с которым перешедшие в раствор положительные заряды образуют поле, действующее от раствора к электроду. Это поле и прекратит дальнейшее растворение цинка. Образующаяся в двойном слое разность потенциалов («скачок потенциала» на границе металл — раствор) может быть различной, она зависит от природы металла и концентрации раствора. При нормальной концентрации на границе цинк — раствор разность потенциалов равна —0,5 В, а на границе медь — раствор она равна +0,61 В. Поэтому между электродами разомкнутого элемента Даниэля образуется разность потенциалов 0,61 В — (—0,5 В)=1,11 В. Это и есть электродвижущая сила элемента Даниэля.

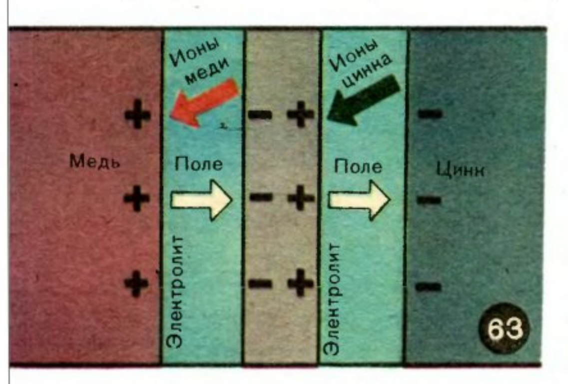
При замыкании цепи возникает электрический ток. Во внешней цепи электроны будут двигаться от цинка к меди (от электрода с большей растворимостью к электроду с меньшей растворимостью). При этом поле двойного слоя у того и другого электрода будет ослабевать, что приведет к переходу цинка в раствор и осаждению меди на электроде.

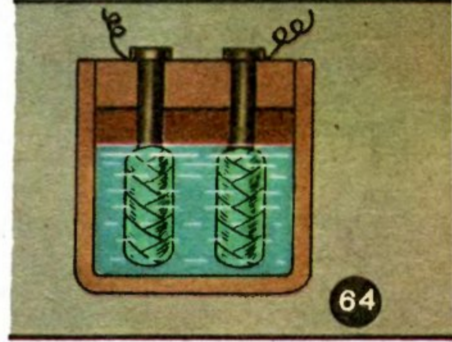
Значительно удобнее работать с элементами без серной кислоты. Из курса физики вы должны знать такие элементы — это элементы Лекланше (сухие и наливные). Электролитом в них служит раствор нашатыря, а деполяризатором — смесь из толченого пероксида марганца и угля.

Основной заботой конструкторов всех элементов, как мы видели, была борьба с поляризацией. Но взглянем на обратную сторону медали. Не может ли поляризация в каких-нибудь случаях оказаться полезной? Оказывается, может и широко используется в конструкциях элементов, называемых поляризационными. К ним относятся прежде всего аккумуляторы.

Известно, что аккумуляторы устанавливаются на автомобилях, на мотоциклах и моторных лодках (кислотные, свинцовые), используются для питания раций (щелочные, железо-никелевые), в карманных фонариках с подзарядкой (кобальто-никелевые); обслуживают аппаратуру искусственных спутников и управляемых снарядов (серебряно-цинковые). Во всех этих аккумуляторах используется явление поляризации, которое возникает при прохождении тока во время зарядки. Накопленные на пластинках аккумуляторов вещества обеспечивают возникновение необходимой разности потенциалов в поляризационных элементах.

Здесь нет нужды повторять сказанное в учебниках о реакциях, происходящих при зарядке и разрядке аккумуляторов. Напомним правила обращения с ними. Самое основное правило обращения со свинцовыми аккумуляторами — это не получать





от них силу тока, большую дозволенного значения. Например, от установленного на машине «Москвич» аккумулятора, рассчитанного на 42 А • ч, нельзя брать ток больше 4—5 А. Нарушение этого правила ведет к искривлению пластин, к выпадению активной массы (смесь сурика и глета) из свинцовой решетки пластин. И второе не менее важное правило: нельзя слишком сильно разряжать свинцовый аккумулятор или оставлять его надолго без подзарядки. Когда напряжение на клеммах аккумулятора упадет ниже 1,8 В на каждую банку (12-вольтовый аккумулятор «Москвича» составлен из шести банок), то начнется процесс сульфатации. Пластины покрываются нерастворимым налетом сульфата свинца, удалить который не удается.

Щелочные аккумуляторы в этом смысле более выносливы, они выдерживают перегрузку при зарядке и могут без гибельных последствий разряжаться до нуля. Но их ЭДС всего 1,25 В на банку против 2 В у свинцовых аккумуляторов.

Новейшие серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые акку-

муляторы замечательны тем, что они в 5—6 раз легче свинцовых и железо-никелевых. Кроме того, они отличаются высокой механической прочностью и простотой ухода. Миниатюрный аккумулятор размером с почтовую марку рассчитан на 0,1 А • ч. Конечно, бывают и большие батареи, рассчитанные на несколько сот ампер-часов.

Несколько слов о газовых аккумуляторах. Первый газовый аккумулятор был построен в 1839 г. Вильямом Грове. Платиновые электроды помещались в цилиндры, из которых один содержал кислород, другой — водород. Цилиндры открытыми концами погружались в сосуд с водным раствором серной кислоты. Электрод, находившийся в кислороде, должен был служить положительным полюсом, в водороде — отрицательным. Но так как реакция с молекулярными газами не идет (необходимы газы в атомарном состоянии), то для перевода их в это состояние электроды покрывались губчатой платиной как катализатором. Во время работы происходило выделение газов в обратном порядке: на положительном полюсе элемента выделялся водород, а на отрицательном — кислород. В том и другом случае при соединении водорода и кислорода образовывалась вода. Элемент работал до истощения запаса газов в цилиндрах.

Простейший газовый аккумулятор можно изготовить самому (рис. 64). Для этого в непрозрачный сосуд налейте раствор поваренной соли (1—1,5 столовых ложки на стакан воды) и в него опустите угольные палочки, окруженные активированным углем, плотно набитым в полотняные мешочки. Заряжать аккумулятор следует обычным способом. На отрицательном полюсе выделяется водород, на положительном — хлор. ЭДС такого аккумулятора 2,2 В.

КАК ОМ МАТЕМАТИЧЕСКИ РАЗРАБАТЫВАЛ СВОЙ ЗАКОН

Знаете ли вы закон Ома? Для того чтобы проверить себя, попробуйте, применяя закон Ома, решить следующую задачу. Несколько одинаковых элементов, каждый с ЭДС E и внутренним сопротивлением r, соединены последовательно, как показано на схеме (рис. 65). Сопротивление проводов в расчет не принимается. Какова разность потенциалов между любыми точками цепи, например между точками A и B или между точками A и C?

В дальнейшем будет приведено решение этой задачи, а пока попытайтесь решить ее самостоятельно.

Прежде чем приступить к рассмотрению закона Ома, инте-

ресно познакомиться с некоторыми фактами из биографии великого физика и его основными трудами.

Годы жизни Георга Симона Ома — 1787—1854. Отец Ома, слесарь в Эрлангене, сумел передать своим детям трудовые традиции фамилии Омов, потомственных вестфальских кузнецов. Барельеф на постаменте памятника Ому в Мюнхене символически изображает вручение отцом сыну орудий своей наследственной профессии. Насколько понимал отец Ома роль образования, видно из того знаменательного факта, что он счел необходимым изучить высшую математику, чтобы следить за учением своих сыновей: старшего, Мартина — впоследствии известного математика и младшего, Георга — физика, установившего основной закон электрического тока.

Георг Ом окончил университет в родном городе и стал учителем математики. Начиная свою трудовую деятельность, жил в большой бедности и переезжал из одного города в другой, пока наконец не обосновался в иезуитской коллегии в Кельне в качестве учителя математики и физики. Здесь проведены им многочисленные эксперименты, здесь сложились его основные воззрения на закономерности электрического тока.

Чтобы понять заслуги Ома в науке, следует учесть ту обстановку, в которой ему пришлось работать.

Всего четверть века прошло с открытия Гальвани и Вольта. Большинство ученых того времени не было вполне убеждено, что электрический ток (от электрических машин) и гальванический ток (от вольтова столба) представляют одно и то же явление. Неизвестый фактор, являющийся причиной гальванического тока, со времен Вольта называли электродвижущей силой. Понятия о потенциале тогда еще не существовало, оно впервые было введено в 1828 г.

С 1825 г. Ом начинает заниматься исследованиями гальванизма. В 1826 г. появляется его работа, содержащая закон, названный впоследствии его именем. Заголовок работы гласил: «Определение закона, по которому металлы проводят контактное электричество, совместно с теорией вольтаического аппарата и мультипликатора Швейгера».

Первые свои опыты Ом проводил, пользуясь собственноручно изготовленным вольтовым столбом и гальваноскопом. При этом он заметил, что сила тока («сила тока» — термин, введенный Омом) в электрической цепи падает после ее замыкания. После размыкания цепи батарея через некоторое время снова восстанавливается. Давая отзыв об одной из первых работ Ома, издатель журнала физик Поггендорф отметил, что желательно было бы, чтобы автор повторил свои эксперименты с более постоянным источником тока, а именно с термоэлементом. Следуя

этому совету, Ом стал применять такую установку (рис. 66). Он составил термоэлемент из согнутых под прямыми углами висмутовой и медной полосок, концы которых скреплялись винтами. Один конец термоэлемента окружался кипящей водой, другой обкладывался тающим льдом. От полюсов шли проволоки, опускавшиеся в чашки с ртутью. Цепь замыкалась проволоками разной длины, присоединявшимися к тем же чашкам. Сила тока определялась действием тока на магнитную стрелку, подвешенную на нити над проволокой, идущей от термоэлемента. Закручивая нить в сторону, противоположную отклоняющему действию силы тока, удавалось вернуть ее в первоначальное положение, в плоскость магнитного меридиана.

В одном из опытов Ома медные проволоки, которые он включал в цепь, последовательно меняя их, были длиной 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 дюймов[1] и толщиной $^7/_8$ линии. Сила тока измерялась по углу закручивания нити. При этом получились следующие результаты:

Длина проволоки, дюймы	2	4	6	10	18	34	66	130
Угол закручивания нити, градусы	$305\frac{1}{4}$	$281\frac{1}{2}$	259	224	$178\frac{1}{2}$	$124\frac{3}{4}$	79	$47\frac{1}{2}$

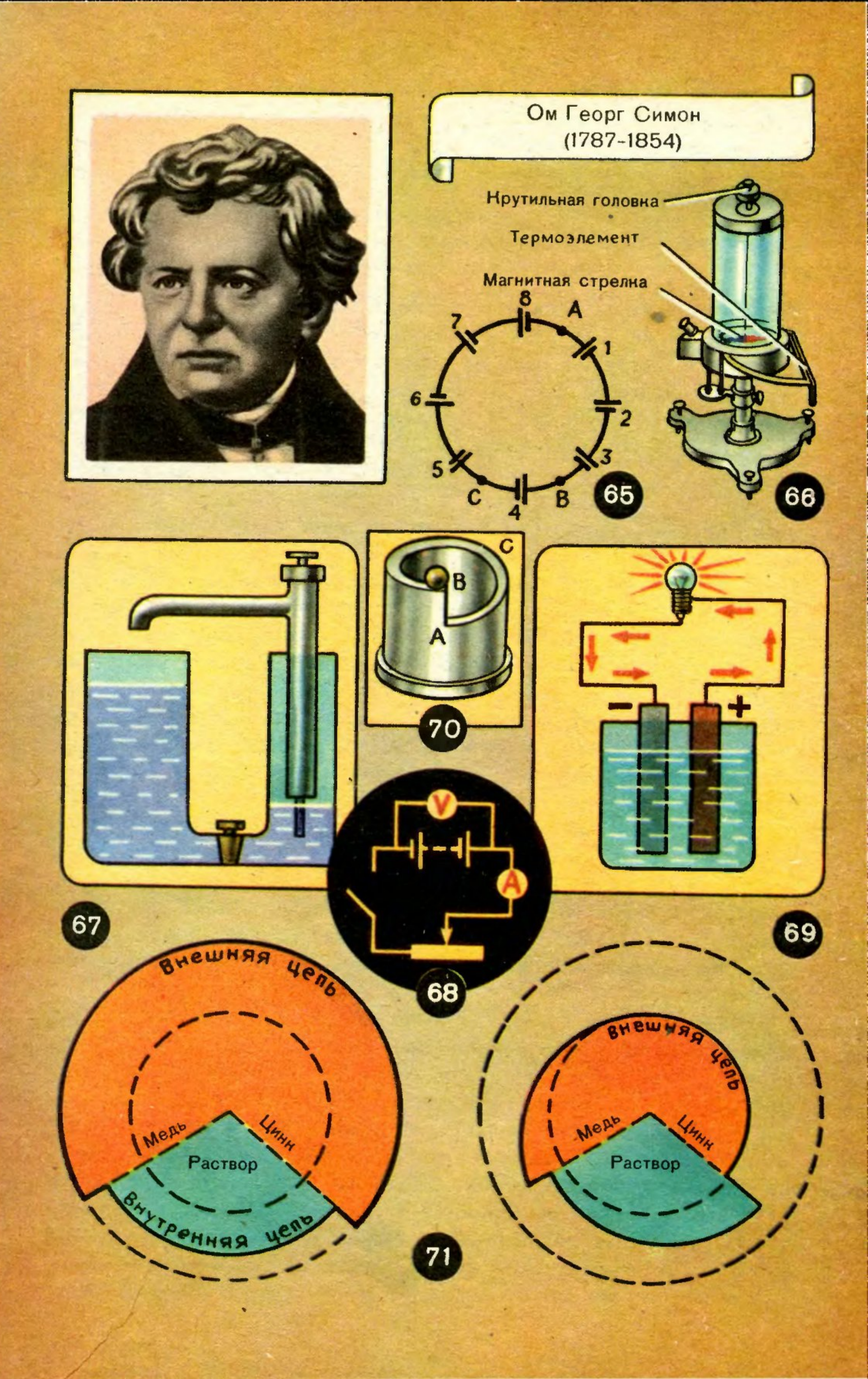
«Эти числа,— писал Ом,— весьма удовлетворительно могут быть выражены формулой $X=\frac{a}{b+x}$, где X — сила магнитного действия при длине введенной проволоки x; a и b — постоянные величины, зависящие от возбуждающей силы и сопротивления остальных частей цепи. Если, например, положить b равным $20\frac{1}{4}$ и $a=6800$, то получим следующие значения:

x, дюймы	2	4	6	10	18	34	66	130
X, градусы	$305\frac{1}{2}$	$280\frac{1}{2}$	259	$224\frac{3}{8}$	$177\frac{3}{8}$	$125\frac{1}{4}$	79	45

Если мы сравним эти числа, полученные вычислением, с числами, полученными раньше из опыта, то увидим, что между этими двумя рядами чисел имеется лишь небольшая разница, вполне допустимая в подобного рода исследованиях».

Силу тока в формуле Ома обозначают буквой I; a является электродвижущей силой E. Величины b и x должны быть вы-

[1] 1 дюйм = 2,54 см; 1 линия = $\frac{1}{10}$ дюйма.


Ом Георг Симон
(1787-1854)
Крутильная головка
Термоэлемент
Магнитная стрелка
8
A
1
2
3
B
4
C
5
6
7
65
66
C
B
A
70
V
A
68
67
69
Внешняя цепь
Медь
Цинк
Раствор
Внутренняя цепь
Внешняя цепь
Медь
Цинк
Раствор
71

ражены в одинаковых мерах, так как складывать можно лишь однородные величины. Они выражают собой: b — внутреннее, x — внешнее сопротивление цепи. Обозначая полное сопротивление цепи $b+x$ буквой R, получим формулу, выражающую закон Ома:

$$I=\frac{E}{R}.$$

Зависимость силы тока от электродвижущей силы Ом показал, создавая различные разности температур на концах термоэлемента, т. е. погружая один из концов его в воду разной температуры, в результате чего получались различные ЭДС. При этом соответственно менялось и отклонение стрелки гальванометра.

В 1826 г. Ом добивается годичной научной командировки в Берлин. Он очень хорошо использовал время пребывания в столице для работы. В 1827 г. появляется основной, составивший ему славу труд «Гальваническая цепь, разработанная математически д-ром Г. С. Омом». В этой работе закон Ома выведен теоретически. На этот вывод Ома натолкнули незадолго до того появившиеся в печати работы французского физика Фурье по теплопроводности. Фурье установил, что скорость распространения теплового потока зависит от разности температур («падения температур») и от длины пути, на протяжении которого это падение происходит, подобно тому как скорость водяного потока зависит от отношения понижения уровня к расстоянию по горизонтали, на котором это понижение происходит. Уподобляя гальванический ток тепловому потоку или потоку воды, Ом пишет: «Переход электричества от одного участка к ближайшему я принял пропорциональным электродвижущей силе в каждом участке подобно переходу теплоты, который пропорционален разности температур». Ом обозначает разность потенциалов на участке (он называет ее электродвижущей силой) словом «падение». Но падение зависит еще и от длины пути, по которому оно распределено.

Таким образом, Ом приходит к выводу, что сила тока прямо пропорциональна электродвижущей силе и обратно пропорциональна длине пути, или сопротивлению цепи. Зависимость сопротивления от длины, площади поперечного сечения и материала проводника тоже была установлена Омом на ряде опытов.

Работа Ома была высоко оценена в Германии. В 1833 г. Ом — профессор политехнической школы в Нюрнберге. Однако за рубежом, особенно во Франции и Англии, работы Ома долгое время оставались неизвестными. Через 10 лет после появления работы Ома французский физик Пулье на основе экспериментов вывел те же закономерности. Когда Пулье было указано,

что установленный им закон еще в 1827 г. был открыт Омом, Пулье, быть может, не зная предыдущих экспериментальных работ Ома, возразил, что в работе Ома «Гальваническая цепь» закон выведен только теоретически, тогда как он (Пулье) основывался на эксперименте. Любопытно, что французские школьники до сих пор изучают закон Ома под именем закона Пулье.

Спор о приоритете принес Ому пользу в том отношении, что способствовал распространению его открытия за границей. В 1841 г. Лондонское Королевское общество в признание заслуг Ома принимает его в почетные члены и награждает золотой медалью Коплея, которой до него удостоился один только Гаусс. В 1845 г. Ом — действительный член Баварской Академии наук. В 1852 г. — ординарный профессор Мюнхенского университета.

Уже говорилось, что Ом использовал для установления закона об электрическом токе аналогию с потоком воды. Возьмем два сообщающихся сосуда, в которые налита жидкость (рис. 67). Соединительная трубка перекрыта краном, поэтому, несмотря на то что жидкость налита в сосуды до разного уровня, тока воды нет. Если открыть кран, то вода начнет перетекать из левого сосуда в правый до тех пор, пока уровни жидкости в обоих сосудах не сравняются. Но это кратковременное и одностороннее движение жидкости, а не замкнутая цепь. Нельзя ли сделать движение непрерывным? Что для этого надо? Перекачивать воду насосом из правого сосуда в левый.

Так и сделаем. Будем наблюдать, как меняется высота уровня в левом сосуде, если изменять при помощи крана ширину соединительной трубки. Не прекращая работы насоса, закроем кран. Насос перекачает всю воду в левый сосуд, и ток прекратится. Теперь высота уровня в левом сосуде наибольшая. Если кран приоткрыть, то насос не будет успевать перекачивать воду из правого сосуда в левый и установится разность уровней. Чем больше будет ширина соединительной трубки, тем меньше будет разность уровней левого и правого сосудов.

Какое же это имеет отношение к нашей теме об электрическом токе? Рассмотрим схему электрической цепи (рис. 68). Если замкнуть цепь, то по ней пойдет электрический ток — возникнет упорядоченное движение электронов в металлических проводах. Внутри батареи ток тоже будет идти, но заряды там переносятся ионами. Сейчас это различие для нас существенного значения не имеет. Если разомкнуть цепь, то ток прекращается, амперметр показывает нуль, зато вольтметр показывает теперь наибольшую для данной цепи разность потенциалов — разность электрических «уровней» на клеммах батареи. Откуда взялась эта разность потенциалов? Это результат химических реакций в элементах. Вместо химического источника разности потенци-

алов — гальванической батареи элементов — мы могли бы взять термоэлемент. Тогда происходящее при нагревании усиление теплового движения электронов в одном из спаев двух металлов привело бы к созданию разности потенциалов. Или можно взять электрический генератор. Необходимая для поддержания тока в цепи разность потенциалов возникает при вращении якоря.

Что общего во всех приведенных примерах? То, что возникновение тока в цепи связано с совершением работы, с превращением энергии.

В рассмотренных примерах мы наблюдаем превращение различной энергии — химической, внутренней, механической — в энергию электрическую. Работе гидравлического насоса в предыдущей установке аналогична работа «химического насоса», «теплового насоса», «механического насоса» в электрической цепи.

Во времена Ома не было еще ясного понятия ни о работе, ни об энергии. Всякую неизвестную причину явления объясняли действием силы. Еще Вольта в своих опытах с разностью потенциалов при контакте двух разнородных металлов объяснял ее появление действием электродвижущей силы, а металлы называл электродвигателями. «Электродвижущая сила»! Слово найдено, и беспокойный ум исследователя успокаивался, как будто ему действительно удалось разъяснить причину. Надо признать, что в данном случае изобретенный Вольта термин обладает большой наглядностью и поэтому оказался весьма живучим, сохранившись до наших дней. Какой смысл вкладываем теперь мы в этот термин? Обратимся к схеме замкнутой электрической цепи (рис. 69). Во внешней части цепи ток идет в направлении электрического поля (от «+» к «—»). Внутри источника он идет против поля, против направления электрических сил. Следовательно, это движение не может быть вызвано электрическими силами. Принято называть эти силы, действующие внутри источника, сторонними силами. Термин «сторонние силы» введен советским академиком И. Е. Таммом и получил всеобщее распространение. Работа сторонних сил на внутреннем участке цепи, т. е. внутри элементов, по перемещению заряда 1 Кл и характеризует электродвижущую силу.

Если цепь разомкнута и тока нет, то работа сторонних сил приводит только к созданию разности потенциалов на полюсах источника. Отсюда весьма простой способ определения электродвижущей силы — надо измерить разность потенциалов на полюсах разомкнутого источника. Если в качестве измерительного прибора взять вольтметр, то измерение будет, естественно, только приближенным, так как вольтметр сам замкнет цепь. Чем большим сопротивлением обладает вольтметр, тем ближе будут

его показания к истинному значению ЭДС. Существуют, однако, вольтметры типа электроскопа, которые не замыкают цепи,— электростатические вольтметры.

Вот модель, сделанная в физическом кружке (рис. 70). Она позволяет наглядно показать энергетические процессы в гальванической цепи. На участке *BCA* шарик скатывается по желобу под действием сил поля тяготения. Потенциальная энергия шарика постепенно уменьшается от *B* к *A*. Если мы хотим, чтобы шарик непрерывно продолжал движение, то нам придется его поднимать каждый раз из точки *A* в точку *B* посторонней силой, действующей против сил поля тяжести. Шарик будет «бегать» до тех пор, пока не будет израсходован весь запас энергии, за счет которой работает подъемник. Так же и в электрической цепи: действие сторонних сил будет продолжаться только до тех пор, пока не будет израсходован запас энергии источника.

На рисунке 71 представлена диаграмма, поясняющая то же явление. Слева чертеж иллюстрирует распределение разности потенциалов в разомкнутой цепи с учетом «скачков потенциалов» в местах контакта химически разнородных частей элемента, а справа более точно, чем только что рассмотренная модель, изображает изменение энергии в замкнутой цепи.

В замкнутой цепи электродвижущая сила проявляется в работе по перемещению единичного электрического заряда по внешней и внутренней частям цепи. Во внешней части цепи электрическая энергия превращается в другие виды энергии (работа электродвигателей, нагревание электрических плиток, питание ламп, зарядка аккумуляторов). Нагревание проводников происходит во всех случаях. На внутреннем участке замкнутой цепи работа сторонних сил также будет вызывать нагревание источника. Мы говорим в таком случае, что происходит падение напряжения во внешней цепи и падение напряжения во внутренней цепи. Следовательно, работа сторонних сил является постоянной для данной цепи, но она состоит из двух частей: работы во внешней цепи и работы во внутренней цепи. Когда уменьшается напряжение на внешнем участке цепи, то увеличивается напряжение на внутреннем участке цепи. Внутреннее сопротивление есть величина постоянная, зависящая только от устройства элемента, следовательно, при этом должна увеличиться сила тока. Падение напряжения на внешнем участке цепи рассчитывается по формуле: $U_{внешн}=IR$. Так же можно выразить падение напряжения на внутреннем участке цепи: $U_{внутр}=Ir$.

Отсюда

$$E=IR+Ir \text{ и } \quad I=\frac{E}{R+r}.$$

Рассмотрим еще тот случай, когда внешняя электрическая цепь, кроме резисторов, имеет участок с ЭДС, включенной навстречу ЭДС источника. Такой ЭДС обладает, например, включенный на зарядку аккумулятор или приводимый в движение электродвигатель постоянного тока. В этом случае для внешней цепи в формулу $U=IR$ надо вместо U подставить $U-E_1$. Тогда

$$U-E_1=IR.$$

Откуда

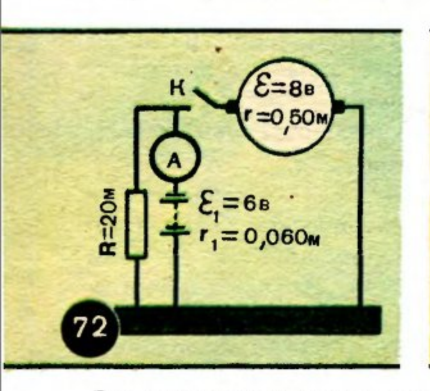
$$I=\frac{U-E_1}{R}.$$

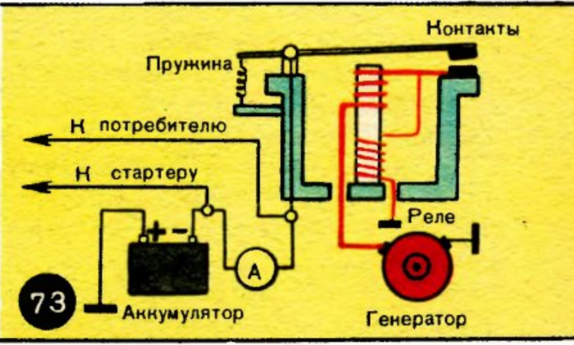
Если подобную подстановку сделать в формулу для полной цепи, то

$$E=IR-E_1+Ir+Ir_1,$$

откуда

$$E+E_1=IR+Ir+Ir_1.$$





Это положение известно под названием второго правила Кирхгофа и представляет обобщение закона Ома. Читается так: во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма (с учетом знаков) всех электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений во всех участках цепи.

Применим это правило к следующей задаче технического содержания. Как известно, все электрооборудование автомобиля (освещение, сигнал, стеклоочиститель, стартер) обслуживается двумя источниками: на остановках и при малых оборотах двигателя батареей аккумулятора, а при больших оборотах двигателя генератором, который вместе с тем подзаряжает и аккумулятор. Рисунок 72 изображает упрощенную схему электрических цепей автомобиля (за исключением цепи стартера). Какую силу тока будет показывать амперметр и каково напряжение на клеммах аккумулятора при замкнутом и разомкнутом положениях ключа K? В действительности замыкание и размыкание производится не ключом, а реле обратного тока, показанным на схеме

(рис. 73). Все «плюсовые» клеммы соединены «на массу» (металл автомобиля), что позволяет обойтись однопроводной системой. Числовые данные указаны на схеме (см. рис. 72).

Решение.

1) Ключ замкнут. Идет зарядка аккумулятора током I_1, через суммарное сопротивление остального электрооборудования идет ток I_2.

Применим второе правило Кирхгофа для правого контура схемы, включающего генератор и аккумулятор. Контур будем обходить по часовой стрелке. Токи, совпадающие с направлением обхода, и ЭДС источников, которые сами создают ток такого же направления, будем считать положительными, тогда

$$E-E_1=I_1r_1+Ir,$$

где I — сила тока, идущего через генератор.

Подставим числовые значения:

$$8\text{ В}-6\text{ В}=I_1\cdot 0{,}06\text{ Ом}+I\cdot 0{,}5\text{ Ом}.$$

Для внешнего контура (генератор, резистор сопротивлением R):

$$E=I_2R+Ir,$$

или

$$8\text{ В}=I_2\cdot 2\text{ Ом}+Ir.$$

По первому правилу Кирхгофа (сумма сил токов в разветвлениях равна силе тока в неразветвленной части):

$$I_1+I_2=I.$$

Решая систему этих трех уравнений, получим:

$$I_1=0{,}85\text{ А}.$$

Отсюда напряжение на зажимах аккумулятора при зарядке

$$U_1=E_1+I_1r_1=6{,}05\text{ В}.$$

2) Ключ разомкнут. Генератор отключен, источник тока — аккумулятор. По второму правилу Кирхгофа для левого контура схемы (аккумулятор и резистор)

$$E_1=I_0R+I_0r_1,$$

или

$$6\text{ В}=I_0\cdot 2\text{ Ом}+I_0\cdot 0{,}06\text{ Ом}.$$

Сила тока от аккумулятора

$$I_0 = \frac{6\ \text{В}}{2{,}06\ \text{Ом}} \approx 3\ \text{А}.$$

Напряжение на зажимах

$$U_2 = E_1 - I_0 r_1 \approx 5{,}8\ \text{В}.$$

Теперь дадим решение задачи, предложенной в начале нашей беседы (см. рис. 65). Допустим, что общее число элементов равно n, число элементов между двумя взятыми точками m. Применяя второе правило Кирхгофа ко всему контуру, получим:

$$En = Irn,$$

откуда

$$E = Ir.$$

Применяя это правило к контуру, состоящему из m элементов и вольтметра, получим:

$$Em = Irm + U.$$

Учитывая, что $I = E/r$, находим

$$U = Em - Em = 0.$$

Ответ: разность потенциалов между любыми точками равна нулю!

ДЕСЯТЬ ОПЫТОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

Можно с уверенностью сказать, что ток в вашей осветительной сети переменный. Ознакомление с особенностями переменного тока обязательно для всякого, кто пользуется различными электрическими установками: радиоприемниками, телевизорами, проигрывателями и другими бытовыми электроприборами.

Почему нельзя прибор, в паспорте которого указано, что он предназначен для переменного тока, включать в сеть постоянного тока? Почему нельзя заряжать аккумулятор переменным током? Будет ли электромагнит работать от переменного тока так же, как от постоянного? Какие электрические измерительные приборы (счетчики, вольтметры и др.) пригодны только для постоянного или только для переменного тока и почему? Лучший способ разобраться в особенностях переменного тока — это эксперимент. Опишем некоторые опыты с переменным током, доступные для выполнения в домашних условиях.

Прежде чем приступить к проведению опытов, прочитайте внимательно правила проведения опытов с током от осветительной сети и в дальнейшем строго соблюдайте их.

1. Все опыты следует выполнять с током от распределительного щита (см. беседу «Короткое замыкание») с предохранителями на 2—3 А.

2. Включать собранную цепь в осветительную сеть можно только после окончания и проверки монтажа. Во время опыта нельзя делать никаких изменений и поправок в цепи. В случае необходимости нужно выключить щит и обесточить всю установку.

3. Необходимо исключить возможность случайного прикосновения к токонесущим металлическим частям установки. Монтаж проводить только изолированным проводом, тщательно обертывая места соединения проводов изоляционной лентой. Применяемые в некоторых опытах лампочки монтируются в соответствующих патронах, укрепленных на деревянных дощечках. Клеммы для присоединения проводов должны иметь карболитовые головки, концы проводов, предназначенные для включения в гнезда розетки, следует заделывать штепсельными наконечниками или снабжать штепсельной вилкой.

4. Опыты, для которых обязательно применение понижающего трансформатора, ни в коем случае без последнего не выполнять.

Некоторые опыты (3, 4, 5, 7, 10) лучше проводить в школе на занятиях кружка или вечерах занимательной физики.

ОПЫТЫ

1. Как узнать, ток переменный или постоянный? Переменный ток в осветительной сети — это ток, меняющий 100 раз в секунду свое направление. Но не только направление тока меняется, меняется и сила тока, и напряжение. Направление меняется периодически, сила тока меняется непрерывно, то возрастая до некоторого максимума, то уменьшаясь до нуля. Полный цикл изменения значений силы тока происходит за $^1/_{50}$ с. Этот промежуток времени называется периодом переменного тока, а число периодов в секунду — частотой тока. Единицей частоты служит герц — это частота, при которой за одну секунду происходит один цикл изменений тока. Следовательно, ток в сети, который питает лампочки, плитки и другие приборы, есть пятидесятипериодный ток. Такая частота обеспечивает возможность применения переменного тока для освещения. Раскаленный волосок электрической лампочки не успевает сильно остыть за то время,

в течение которого сила тока равна или почти равна нулю. Кроме того, и наш глаз не может подметить быстро следующих колебаний освещенности.

Но как тогда узнать, переменный ток у нас или постоянный? Вот один из способов, не требующий никаких приборов. Надо взять какой-нибудь тонкий блестящий предмет — ножницы, нож, вязальную спицу или полировальную палочку и, став спиной к зажженной электрической лампе, держать его на вытянутой руке на расстоянии 50 см от глаз. Затем привести предмет в быстрые колебания и наблюдать отраженный от него свет (рис. 74). Если при этом видна равномерно светящаяся полоса, то ток, идущий через лампу, постоянный. Если полоса распадается на ряд чередующихся светлых и темных участков, то сеть питается переменным током.

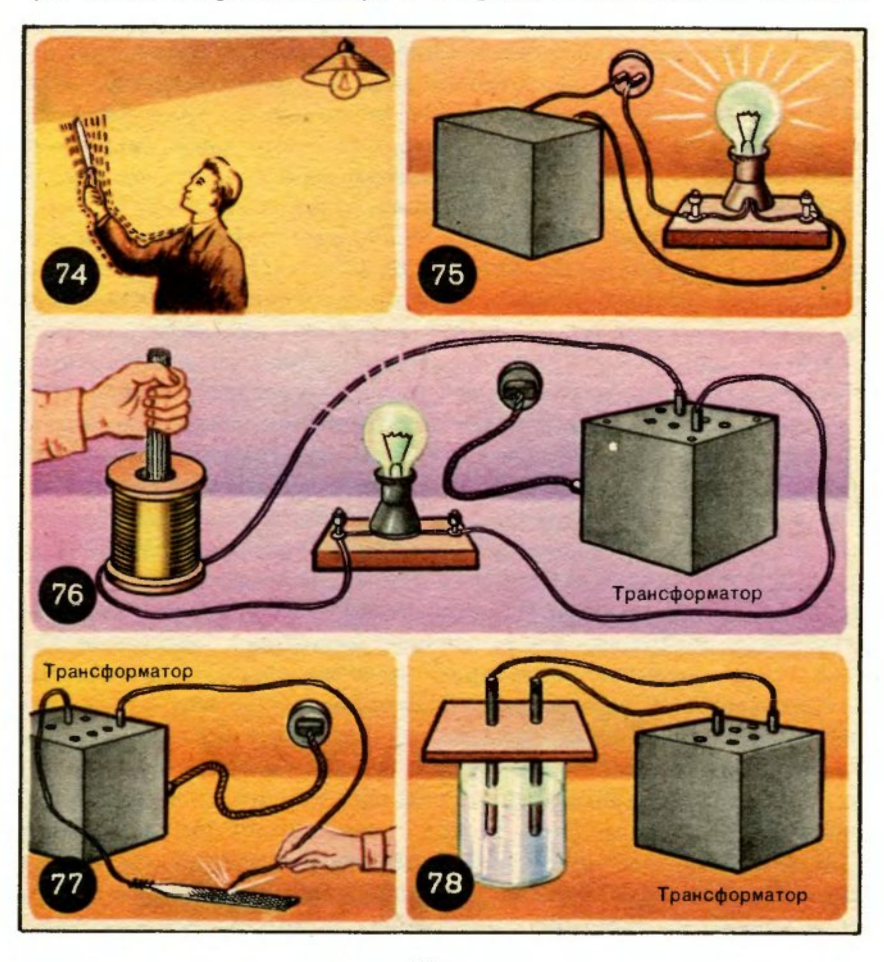
2. Переменный ток через конденсатор. Как только вы установите распределительный щит, вам, конечно, захочется испытать его в действии. Вы берете обычную пробную электрическую лампочку мощностью 25 Вт, вставленную в патрон, от которого идут два провода со штепселями на концах. Вставив штепселя в гнезда розетки на распределительном щите, вы видите, что лампочка горит. Стоит вынуть один штепсель из розетки, свет гаснет. Ну, разумеется! Ток ведь может идти только в замкнутой цепи. Но подождите.

Известно, что конденсатор в простейшем виде — это две параллельные металлические пластинки, разделенные каким-нибудь изолятором, хотя бы прослойкой воздуха. Чем больше площадь пластинок и чем они ближе расположены друг к другу, тем больше емкость конденсатора. Влияет на емкость еще и род диэлектрика (изолятора) между пластинками. В магазинах радиодеталей можно приобрести конденсатор (бумажный) емкостью 1 или 2 мкФ. Может быть, у вас есть такой конденсатор. Включите его последовательно с лампочкой в осветительную сеть (рис. 75). Будет ли гореть лампочка? Если ток постоянный, то, действительно, он через разомкнутую цепь проходить не будет (так как пластинки конденсатора разделены изолятором) и лампочка не загорится. А если ток переменный? Испытайте на опыте. Лампочка горит, хотя и не полным накалом! Если закоротить клеммы конденсатора, то свечение лампочки достигает полной яркости.

Итак, переменный ток «проходит» через конденсатор! Как это может быть? Слово «проходит» мы взяли в кавычки, потому что то, что происходит в конденсаторе, не похоже на постоянный ток проводимости, о котором шла речь в предыдущих беседах.

Если включить конденсатор в цепь постоянного тока, то оказывается, что ток в цепи идет, но очень короткое время. Направ-

ленное перемещение электрических зарядов происходит до тех пор, пока пластины конденсатора не зарядятся до того же потенциала, что и клеммы источника. Мы обычно не замечаем этого кратковременного явления. Представим себе теперь, что значение потенциала на гнездах розетки и его знак меняются по законам переменного тока. Тогда и разность потенциалов между гнездами розетки и соответствующими пластинами также все время будет меняться. В цепи будет идти ток то от розетки к пластине, то от пластины к розетке. При этом будет изменяться не только направление, но и значение силы тока. Чем больше емкость конденсатора, тем сила тока в цепи больше. Сопротивление конденсатора прохождению тока при прочих равных условиях обратно пропорционально его емкости. Заметим при этом, что если бы провода, идущие к конденсатору, не нагревались (не имели сопротивления), то энергия, посылаемая от источни-



ка к конденсатору, возвращалась бы к источнику за следующую часть периода без потерь.

3. Переменный ток через катушку. В домашних условиях опыт удобнее всего поставить с катушкой из 400—500 витков изолированной проволоки (0,5—0,8 мм), намотанной на картонный или деревянный каркас (хотя бы от швейной катушки большого размера). В катушку должен входить железный сердечник, собранный из железных проволок. Сердечник должен быть таким, чтобы его было удобно вдвигать в катушку и вынимать из нее. Напряжение в этом случае берется от понижающего трансформатора малой мощности. В магазинах электросбыта можно приобрести трансформатор для маловольтных бытовых приборов и детских игрушек (опыты 4, 5, 6 и 8 проводятся также с этим трансформатором). Он позволяет преобразовать напряжение сети 220 или 127 В в низковольтное напряжение: 2, 4, 6 и т. д. до 24 В (заметим, что напряжения до 36 В относятся к «малым напряжениям» и безопасны для экспериментирования). Включите последовательно с изготовленной вами катушкой маловольтную (6—12 В) лампочку. От трансформатора следует взять напряжение, меньшее паспортного напряжения лампочки, чтобы лампочка горела слабым накалом, тогда колебания ее яркости во время опыта будут заметнее.

Если опыт будет ставиться в школе на занятиях кружка или на вечере занимательной физики, то в этом случае удобен универсальный разборный трансформатор, имеющийся в физическом кабинете. Предварительно вынув сердечник из катушки, подключают цепь к источнику переменного тока. Лампочка горит так же, как и без катушки (это можно проверить, закорачивая клеммы катушки). При вдвигании сердечника в катушку яркость лампочки уменьшается (рис. 76). Опыт показывает, что катушка оказывает сопротивление току. Это сопротивление называют индуктивным сопротивлением, его значение зависит от числа витков, плотности намотки, наличия железного сердечника, диаметра катушки и сердечника. Причиной индуктивного сопротивления служит явление самоиндукции. Оно состоит в том, что изменение магнитного поля, которое происходит при изменении силы тока, вызывает появление электродвижущей силы, которая создает ток самоиндукции, направленный всегда так, что своим магнитным действием он препятствует изменению поля первичного тока.

Один и тот же проводник в разных условиях может обладать различной самоиндукцией. В проводнике, свернутом в катушку, при наличии железного сердечника самоиндукция становится во много раз заметнее. Поэтому электротехники различают два рода цепей: «безындукционные цепи» (цепи с малым индуктив-

ным сопротивлением), например осветительная сеть, и цепи с «индуктивной нагрузкой», когда в них имеются моторы, трансформаторы и им подобные устройства. В цепи с постоянным током самоиндукция проявляется лишь при замыкании и размыкании. Поэтому одно и то же устройство почти всегда обладает бо́льшим сопротивлением в цепи переменного тока, чем в цепи постоянного.

4. Искра при размыкании. Вынимая штепсель из розетки при выключении какого-нибудь электроприбора, вы, конечно, замечали появление искры. Это результат самоиндукции. При размыкании направление индукционного тока совпадает с направлением исчезающего тока в цепи. Поэтому в момент размыкания происходит сложение внешней ЭДС и ЭДС самоиндукции, что и приводит к образованию искры. Особенно сильно искрение при наличии индуктивной нагрузки в цепи. Индуктивной нагрузкой может быть обмотка трансформатора.

Обмотайте один, зачищенный до блеска, конец провода вокруг ножки стального напильника, а другой, заделанный в штепсельный контакт, вставьте в гнездо панели трансформатора. Если вы теперь возьмете второй провод и, вставив его одним концом в другое гнездо трансформатора, начнете свободным концом водить по напильнику, то увидите целый фейерверк искр (рис. 77). Не опасайтесь, что может быть короткое замыкание в осветительной сети. Между сетью и трансформатором, к которому подключен напильник, существует гальванический разрыв, и проводимый опыт безвреден для нее. Разумеется, не следует затягивать опыт, чтобы не сжечь обмотку трансформатора.

Неплотный контакт в электрическом монтаже может приводить к нежелательным явлениям и в бытовой электрической проводке. В местах разрыва контакта происходит постоянное искрение (иногда слышится потрескивание), и это вызывает опасное разогревание проводки в месте соединения.

5. Химические действия тока. Известно, что нагревательные и осветительные приборы можно включать в сеть постоянного и в сеть переменного тока. Можно ли переменным током пользоваться наравне с постоянным и для химических действий — электролиза, зарядки аккумуляторов? Проверьте на опыте (рис. 78). Приготовьте два длинных графитовых стержня (сердцевина карандаша). Обмотайте верхние концы их зачищенным проводом и опустите нижними концами в стакан с водой. Воду следует подкислить несколькими каплями серной кислоты или растворить в ней небольшое количество поваренной соли. Если теперь присоединить свободные концы проводов к трансформатору, то при включении тока будет заметно обильное выделение пузырьков газа на обоих графитовых электродах. При этом не

будет какого-либо различия в явлениях, происходящих на том и на другом электроде. Если бы вы применили постоянный ток, например от батарейки для карманного фонарика, то сразу обнаружили бы значительную разницу. Пузырьки выделялись бы преимущественно на катоде. При электролизе серной кислоты на катоде выделяется водород, и по объему его выделяется вдвое больше, чем кислорода на аноде. При электролизе поваренной соли на катоде выделяется водород, а на аноде — хлор, газ желтовато-зеленого цвета, с характерным запахом. Если электроды взять медные, а не графитовые, то при постоянном токе пузырьки водорода будут выделяться обильно на катоде, а на аноде выделение газа вообще не будет заметно. При этом кислород или хлор образует с медью соединение (голубого или зеленого цвета), а медная проволочка довольно быстро растворится. Этот опыт можно использовать в качестве простейшего способа распознавания полюсов источника тока.

Следовательно, переменный ток для электролиза применяться не может.

6. Содовый выпрямитель. Приготовьте 10%-ный раствор двууглекислой соды (питьевой соды) в дождевой или дистиллированной воде. Опустите в раствор два электрода. Один электрод из алюминия (проволока, зачищенный провод, ложка), другой из железа, свинца или графита (рис. 79). При пропускании тока через такой выпрямитель происходит электролиз, в результате которого алюминиевый электрод (если он служит анодом) покрывается пленкой из оксида и гидроксида алюминия. Такая система способна пропускать ток только в направлении от железа, свинца или графита к алюминию. Получившийся прибор можно использовать для выпрямления тока. Направление выпрямленного тока можно определить по магнитному или химическому действию.

7. Электролиз стекла. Проводит ли стекло электрический ток? Но ведь стекло — изолятор, скажете вы. В физическом кабинете много приборов для опытов по электростатике, и в них стеклянные изолирующие части предохраняют от утечки зарядов в землю. Надо только, чтобы стеклянные подставки были сухими.

Проделайте такой опыт. Возьмите небольшую стеклянную трубку или палочку диаметром 3—4 мм и обмотайте несколькими витками зачищенной медной проволоки, как показано на рисунке 80, оставив между проводниками промежуток 10 мм. Один конец, не менее 10 см, оставьте свободным, чтобы было удобно и безопасно держать трубку в руке. Последовательно соедините прибор с лампой мощностью 60—100 Вт и включите его в осветительную сеть.

Разумеется, ток через стекло не пойдет и лампа гореть не будет. Подогрейте теперь стеклянную трубку между проводниками в пламени спиртовой горелки. Через некоторое время трубка раскалится докрасна и электрическая лампочка начнет постепенно разгораться. Уберите спиртовку. Несмотря на это лампа продолжает гореть, а стекло раскаляться все сильнее и сильнее, пока не расплавится и цепь не разорвется. Объяснение этого опыта не так уж просто. Мы ограничимся лишь указанием на то, что проводимость стекла имеет иную физическую природу, чем проводимость металлов. У нее та же основа, что и у проводимости жидкостей (электролитов). Рассмотренный нами процесс связан с явлениями электролиза.

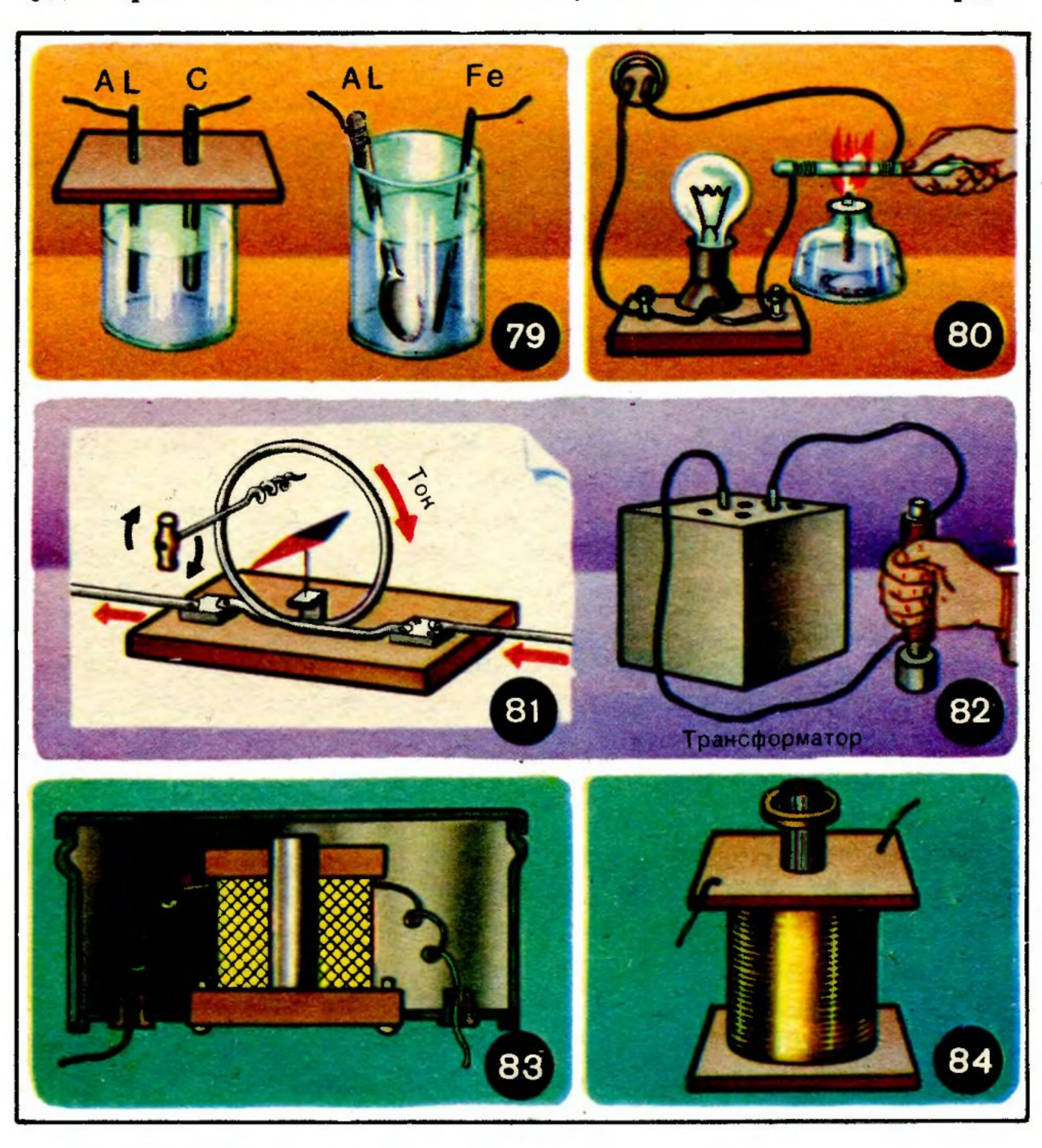
8. Магнитные действия переменного тока. Неотъемлемым признаком электрического тока является магнитное поле вокруг него. Направление магнитного поля зависит от направления тока. Английскому физику Максвеллу принадлежит известное правило буравчика (рис. 81). При прохождении переменного тока по проводу будет соответственно изменяться направление линий магнитной индукции. Если обмотать изолированным проводом железный стержень, то при пропускании переменного тока получится электромагнит, полюсы которого будут меняться с частотой тока (рис. 82). Может ли такой электромагнит притягивать к себе куски железа? Проверьте на опыте и убедитесь, что может. Ток берите от маловольтной обмотки трансформатора (8—12 В). Притянутый к электромагниту якорь (кусок железа) хотя и несколько вибрирует, но не отпадает. Существуют электроизмерительные приборы (амперметры и вольтметры), действие которых основано на втягивании мягкого железа в катушку, по которой идет ток. Они одинаково пригодны для постоянного и для переменного тока. Такие приборы очень распространены; их называют электромагнитными. Их внешний отличительный знак на шкале показывает, что ими можно пользоваться для того и другого тока. Однако в приборах более точного класса шкала для постоянного тока не совпадает со шкалой для переменного тока (вы теперь сможете ответить, почему). В этом случае знак «—» или «∼» укажет вам, для какого тока они предназначены.

На намагниченную стальную пластинку, например стрелку компаса, переменный ток за каждый цикл дважды оказывает противоположные отклоняющие действия. Если перемены направления происходят часто (частота тока равна 50 Гц), то стрелка не будет успевать отклоняться ни в одну, ни в другую сторону, а будет дрожать около положения равновесия. Приборы, основанные на действии дугообразного магнита на подвижную катушку с током, называются магнитоэлектрическими. Они при-

годны только для постоянного тока. На их шкале обычно ставится условный знак «—».

9. Электрическая сирена. Применим только что сказанное к устройству забавного прибора — электрической сирены, или электрической жужжалки. Для этого надо иметь плоскую жестяную коробочку, внутри которой укреплена катушка с железным сердечником (рис. 83). Расстояние от конца сердечника до жестяной крышки коробочки не больше 3 мм, диаметр сердечника не меньше 10 мм. Число витков катушки 500; их может быть и больше.

Провода от катушки пропускаются через фарфоровые втулочки во избежание короткого замыкания. Сирена работает от переменного тока. В качестве реостата используется большая электрическая лампа. В зависимости от мощности лампы жужжание будет громче или тише. Изменяющееся магнитное поле сердеч-



ника заставляет жестяную крышку (мембрану) колебаться с частотой, равной частоте тока.

10. Опыт с вихревыми токами. В сплошных металлических телах, помещенных в переменное магнитное поле, возникают вихревые токи. Возьмите катушку из 500 витков изолированной проволоки (диаметр 0,8 мм), намотанной на картонную гильзу (высота 20 см, внутренний диаметр 3 см) с двумя деревянными дощечками на концах. Внутрь катушки поместите сердечник из пучка хорошо обожженной железной проволоки. Длина сердечника на 10 см больше высоты катушки (рис. 84).

Затем из оголенной медной проволоки сделайте кольцо диаметром на 10—15 мм больше диаметра сердечника (вместо проволочного можно взять сплошное медное или алюминиевое кольцо).

Концы катушки включают в сеть через специально подобранный резистор (с тем чтобы сила тока не превышала 3—5 А); в качестве такого резистора можно использовать электроплитку. Кольцо, надетое на сердечник, в момент включения взлетает вверх. Если попытаться удержать его, то рука почувствует, как сильно нагрелось кольцо.

Объяснение: в сплошном кольце возникают сильные вихревые токи, по направлению противоположные току в катушке. Как известно из курса физики, противоположно направленные токи отталкиваются. Если же кольцо удерживать, вихревые токи нагревают его. На этом принципе в технике основано устройство индукционных печей для плавки металлов.

ГЛЯДЯ НА СЧЕТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Игорь, стоя на табуретке, смотрит на электрический счетчик, в руках у него часы. Входит Лиля.

— Что ты там делаешь? Опять устроишь короткое замыкание?

— Я проверяю счетчик. Подожди, через 2 минуты я кончу... Ну, вот и все! Сейчас подсчитаю и скажу, правильно ли работает счетчик. Пойди выключи плитку в столовой и быстро возвращайся... Выключила? Хорошо. Теперь скажи, как ты думаешь, что подсчитывает счетчик?

— Электричество...

— Электричество. Это ни о чем не говорит. Кулоны, что ли? Нет, счетчик подсчитывает израсходованную электрическую энергию. Счетчик подсчитывает ее в гектоватт-часах. Бывают счетчики и на киловатт-часы. Что такое ватт?

— Ватт — это единица мощности, это мощность тока в 1 А при напряжении 1 В.

— Как подсчитать мощность?

— Надо напряжение умножить на силу тока:

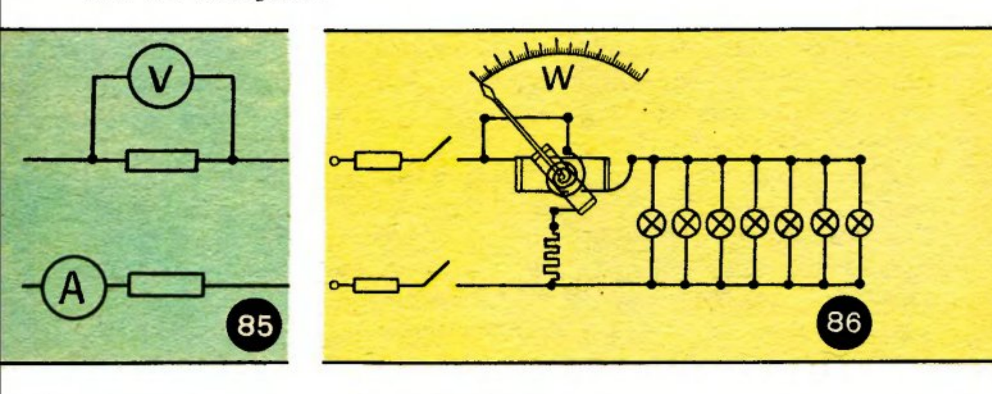
$$P = UI.$$

— Правильно. Если надо подсчитать расход энергии, то мощность надо умножить на время:

$$W = Pt = UIt$$

Счетчик это умножение и производит. Сейчас я по рисункам в книжке объясню, как устроен и работает счетчик.

Чтобы лучше понять, вспомним, как измеряются все три величины: напряжение, сила тока, время. Начнем с напряжения. Как его измеряют?



— Напряжение измеряют вольтметром. Вольтметр надо включить параллельно тому участку, на котором измеряют напряжение. Чертим схему (рис. 85, вверху). Силу тока измеряют амперметром, его включают последовательно с потребителем (рис. 85, внизу).

У нас на лабораторных занятиях Тася Иванова включила амперметр параллельно и испортила его. Почему нельзя включать амперметр параллельно?

— Амперметр имеет очень малое сопротивление, и если включить его последовательно с потребителем, то через него идет ток почти такой, какой шел через потребитель и без включенного амперметра. Если подключить амперметр параллельно лампочке, имеющей сопротивление гораздо большее, чем у амперметра, то сила тока, идущего через амперметр, будет во столько раз больше, во сколько раз сопротивление амперметра меньше сопротивления лампочки.

Вот этот ток и сжег амперметр.

— А почему не сгорает вольтметр, ведь его включают параллельно?

— У вольтметра очень большое сопротивление, и по нему идет небольшой ток.

— А если вольтметр включить не по правилам, не параллельно, а последовательно, что тогда?

— Вольтметр не испортится, но покажет напряжение не на лампочке, а на самом себе. И напряжение будет гораздо больше, чем на лампочке. Напряжения на последовательных участках прямо пропорциональны сопротивлениям.

А теперь посмотрим, как производится «электрическое умножение». Пусть мы хотим измерить мощность. Для этого существует прибор ваттметр. На рисунке 86 дана его схема. Тут две катушки: одна из толстой проволоки (амперова катушка), другая из тонкой (вольтова катушка). Амперова катушка неподвижна, вольтова может внутри нее поворачиваться. Если в катушках будут токи, то они будут действовать друг на друга и подвижная катушка будет поворачиваться на некоторый угол (стать параллельно неподвижной ей мешает пружина). Поворачиваясь, катушка поворачивает и соединенную с ней стрелку, которая и указывает на шкале мощность тока. В самом деле, неподвижная катушка включена последовательно с потребителем, подвижная — параллельно. В зависимости от силы токов в катушках угол поворота будет больше или меньше. Пусть сила тока в амперовой катушке будет в два раза больше, а напряжение (а следовательно, и сила тока!) на вольтовой катушке увеличится в три раза, тогда показание всего прибора станет в $2 \cdot 3 = 6$ раз больше. Значит, если первоначально сила тока была 1 А, а напряжение 1 В, т. е. мощность была 1 Вт, то теперь мощность равна 6 Вт.

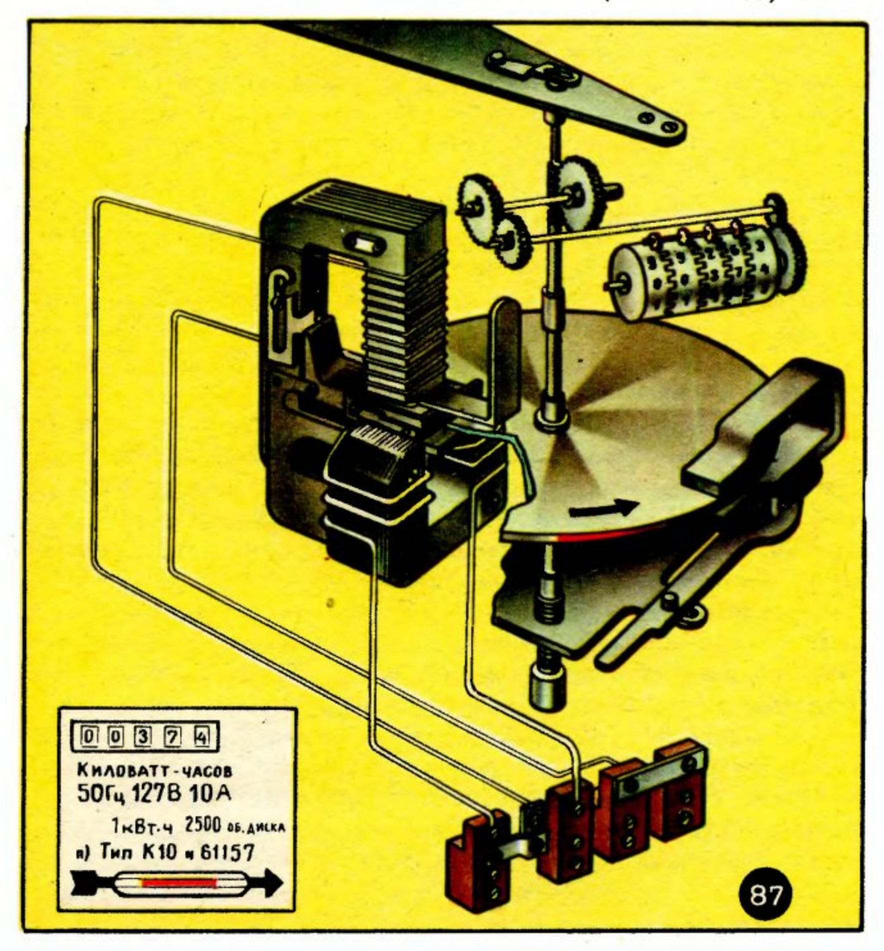
В счетчиках (рис. 87) есть две неподвижные обмотки. Они надеты на два железных сердечника, расположенных под прямым углом. Переменный ток намагничивает эти сердечники. Причем, так как ток переменный, полюсы электромагнитов все время меняются, между ними как бы «бежит» магнитное поле. Нам учитель так и назвал его — «бегущее поле». Между катушками с сердечниками помещается алюминиевый диск на оси. Бегущее магнитное поле образует в теле диска вихревые токи и увлекает его за собой. Диск начинает вращаться вокруг своей оси. В зависимости от силы токов в катушках скорость вращения диска будет больше или меньше. Значит, скорость вращения диска будет пропорциональна потребляемой мощности.

Диск связан со счетным механизмом, который может считать число оборотов за месяц, год и т. д. Он состоит из системы зубчатых колес с передаточным числом 10. Вместе с зубчатками на оси насажены колесики с цифрами на ободках: 0, 1, 2, ... до 9.

Ряд этих цифр виден через окошечки, расположенные в одну линию. Как только сменятся все десять цифр в одном окошечке, так появится новая, на единицу бо́льшая, в ближайшем левом, и т. д.

Я смотрел на счетчик только 2 минуты, и изменения в цифрах счетчика еще не произошло. Но я для проверки счетчика считал обороты диска по красному пятнышку на его ободке. Диск сделал 36 оборотов. На счетчике, на его табличке (паспорте), написано, что 1 гВт·ч по его счетному механизму соответствует 200 оборотам диска. Значит, какая энергия была израсходована за 2 минуты? $\frac{36}{200}$ гВт·ч=18 Вт·ч.

Предварительно я включил плитку мощностью 600 Вт. За 2 минуты ($\frac{1}{30}$ ч) она должна была израсходовать 600 Вт · $\frac{1}{30}$ ч = = 20 Вт · ч; счетчик же показал на 2 Вт · ч (или на 10%) мень-



ше. Это слишком большая погрешность. Допустимая погрешность 3—4%. Но, может быть, плитка работала не на полную мощность, какая обозначена в паспорте, ведь напряжение в сети часто меньше нормального. Все-таки я после сделаю еще несколько проверок с разными нагрузками.

— А у плитки есть паспорт?

— У каждого электроприбора имеется паспорт. Давай проведем учет мощности всех наших домашних приборов. Я буду записывать, а ты смотри на приборы и говори мне.

Через некоторое время опись составлена:

Ламп по 25 Вт	2 шт.	Мощность	50 Вт
„ 60 „	3 „		180 „
„ 100 „	1 „		100 „
Плитка	1 „		600 „
Утюг	1 „		300 „
Пылесос	1 „		350 „
Стиральная машина	1 „		400 „
Холодильник . . .	1 „		100 „
Итого			2080 Вт

— Интересно, какой ток пойдет через счетчик, если все эти приборы включить одновременно?

— Ответ таков:

$$I=\frac{2080\ \text{Вт}}{220\ \text{В}}\approx 9\ \text{А}.$$

Предохранительные пробки у нас на 10 А, значит, сеть была бы нагружена до предела. Конечно, не может быть, чтобы все было включено сразу, да при такой нагрузке и напряжение, наверно, снизилось бы и приборы работали бы не на полную мощность.

Зная мощность приборов, можно рассчитать, сколько будет израсходовано электроэнергии. Например, сколько времени ты сегодня употребила на разглаживание платья, фартука?

— Полчаса.

— Мощность утюга 300 Вт. Следовательно,

$$W=300\ \text{Вт}\cdot 0{,}5\ \text{ч}=150\ \text{Вт}\cdot\text{ч}.$$

По цене 4 к. за 1 кВт·ч это будет стоить $\frac{150\ \text{кВт}\cdot\text{ч}\cdot 4\ \text{к.}}{1000\ \text{кВт}\cdot\text{ч}}=0{,}6$ к.

Моя проверка счетчика обошлась в $\frac{600\ \text{кВт}\cdot\text{ч}\cdot 4\ \text{к.}}{1000\ \text{кВт}\cdot\text{ч}}\cdot\frac{1}{30}=0{,}08$ к.

Оставим Игоря и Лилю продолжать их исследования и обратимся к числам иного масштаба, к волнующим перспективам электрификации нашей страны.

Гениальная формула В. И. Ленина — «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» — определяет намеченные Программой КПСС невиданные темпы внедре-

ния электроэнергии в нашу промышленность, наше сельское хозяйство, наш быт.

Попробуйте построить диаграмму роста выработки электроэнергии в СССР по следующим данным:

1913 г.	1,2	млрд.	кВт·ч
1930 г.	8,8	"	"
1940 г.	48,3	"	"
1955 г.	170,2	"	"
1965 г.	506,7	"	"
1970 г.	740,9	"	"
1980 г.	1294	"	"
1985 г. (планируется)	1555	"	"

Еще интересны такие цифры. Первенец гениального ленинского плана электрификации СССР Волховская ГЭС обладала в 1926 г. мощностью 60 тыс. кВт; Днепрогэс в 1936 г.— 436 тыс. кВт; Волжская ГЭС имени В. И. Ленина (1960) — 2,3 млн. кВт; Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС (1965) — 2,5 млн. кВт.

Самыми крупными гидроэлектростанциями являются Братская ГЭС имени 50-летия Великого Октября на Ангаре мощностью 4,5 млн. кВт и Красноярская ГЭС имени 50-летия СССР на Енисее — 6 млн. кВт.

Большие выгоды нашей стране дает планомерное создание ЕЭС, которая с подключением в сентябре 1978 г. энергетической системы Сибири с ее мощными электростанциями — Братской ГЭС имени 50-летия Великого Октября, Усть-Илимской, Красноярской имени 50-летия СССР — достигла протяженности 7 тыс. км. Это обеспечило условия для более свободного маневрирования энергией.

В одной из основных отраслей техники — энергетике ясно видны громадные успехи, которые являются свидетельством совершающейся в нашей стране грандиозной промышленной революции.

КАК СОЗДАВАЛАСЬ КАРТИНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

ФАРАДЕЙ И МАКСВЕЛЛ

Около 1800 г. Вольта изобрел «вольтов столб» — источник постоянного тока. В 1820 г. Эрстед открыл действие тока на магнитную стрелку. Несколькими месяцами позже Ампер, проделав аналогичный опыт, установил, что два параллельных проводника, по которым идет ток в одном направлении, притягиваются друг к другу и отталкиваются, если токи имеют противополож-

ные направления. Им же были исследованы свойства соленоида и создан прибор, названный гальванометром. В дальнейшем Ампер обнаружил взаимодействие соленоидов и подметил сходство их с магнитами.

В этот же период Араго открыл явление намагничивания железа током и построил первый электромагнит.

Эта эпоха больших открытий находится в непосредственной связи с бурным прогрессом в промышленности в период начального развития и утверждения капитализма после победы над феодальным, застойным способом производства. Резко увеличилась потребность в более совершенной технике производства, транспорта, связи. Живейший интерес среди ученых этой эпохи встречает каждое новое открытие в области электричества, будь то случайное открытие доктора Гальвани или Эрстеда или планомерные исследования Ампера и Араго.

Плеяда первоклассных ученых, профессоров лучших университетов Европы занимаются исследованием и решением совершенно новых проблем и шаг за шагом проникают в неведомый мир электрических явлений и законов строения материи. Среди этих блестящих имен выделяется имя великого английского физика и химика Майкла Фарадея, ученого-самоучки, получившего в школе только начальное образование. Гению Фарадея принадлежит идея об электромагнитном поле, которая легла в основу всего дальнейшего развития физики и техники. Но сначала обратимся к некоторым эпизодам его удивительной биографии.

Один из декабрьских дней 1812 г. Сэр Гемфри Дэви только что окончил чтение довольно странного письма. Некий юноша — ученик переплетчика, подписавшийся никому в то время не известной фамилией Фарадей, сообщал в письме, что он усердно посещал курс популярных лекций Дэви в Королевском институте. Он писал о своем горячем желании посвятить себя научной деятельности. К письму были приложены записи прослушанных лекций, тщательно переписанных и собственноручно переплетенных автором письма.

— Вот письмо одного юноши, по имени Фарадей; он слушал мои лекции и просит дать ему место в институте. Что мне с ним делать? — обратился Дэви к присутствующему при чтении письма институтскому товарищу Пипису.

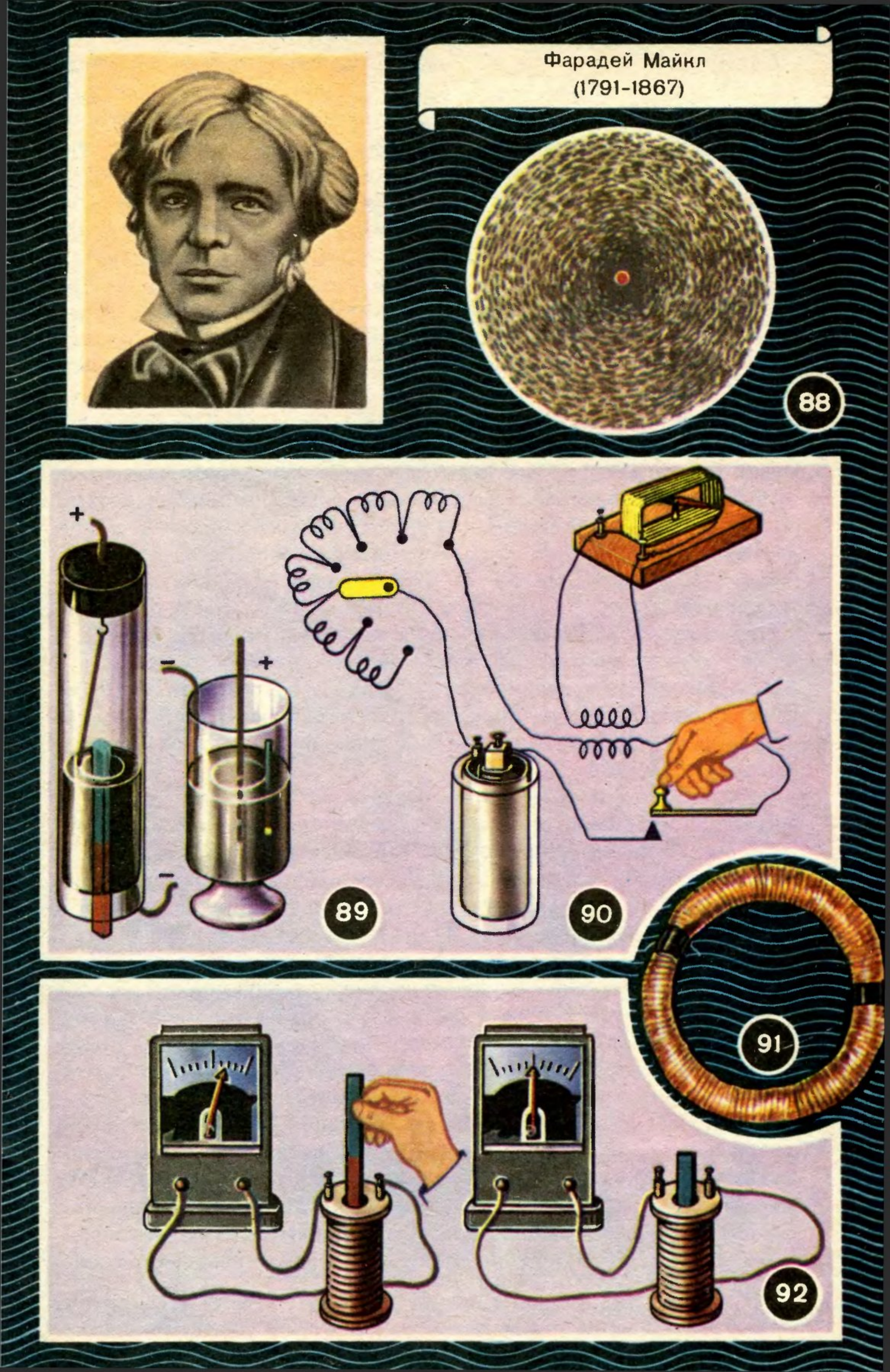
— Что делать? Вели ему мыть бутылки,— отвечал Пипис.— Если он согласится, то из него будет толк, если же нет, то он ни к чему не годен.

В марте 1813 г. по ходатайству Дэви Фарадей получает место ассистента в лаборатории Королевского института. Здесь были выполнены все работы Фарадея, сначала в области химии, а с

1820 г. преимущественно в области электричества. Только что нашумевшее открытие Эрстедом действия тока на магнитную стрелку возбудило в ученом мире исключительный интерес, и открытия в этой области следовали одно другого поразительней. Араго показал, что железные опилки притягиваются к медному проводу, когда по нему идет гальванический ток. Повторяя опыты Араго, Дэви обнаружил, что опилки, рассыпанные на листе бумаги, сквозь которую проходит перпендикулярно к листу проводник с током, располагаются вокруг провода концентрическими окружностями (рис. 88). В дневнике его ассистента Фарадея помещен рисунок, показывающий расположение этих опилок,— рисунок, который сейчас можно видеть в любом учебнике физики. Фарадей и сам проделал много опытов с магнитной иглой и проводником с током. Поведение магнитной стрелки наводило на мысль: нельзя ли получить непрерывное вращение магнита вокруг провода или заставить проводник с током вращаться вокруг магнита? Осуществлению такого вращения мешало то обстоятельство, что магнит обладает двумя полюсами. Фарадей нашел способ устранить это затруднение. Рисунок 89 иллюстрирует опыты, дающие понятие о том, как это было осуществлено. Проволока, подвешенная на крючке другой проволоки, по которой подводится ток, вращается (отклоняясь под действием центробежного эффекта) вокруг полюса магнита. На другом рисунке показано, как вертикально плавающий в ртути магнит, отягощенный снизу платиновым грузом, плавает вокруг проводника с током. В том и другом случае второй полюс магнита, как более удаленный, не оказывает мешающего противоположного действия. Описанные два опыта содержат в себе основные идеи взаимодействия электричества и магнетизма: замкнутая магнитная линия и замкнутый контур тока («вихрь», по выражению самого Фарадея) в том и другом случае представляют как бы два звена одной цепи.

В 1827 г. Фарадей получил профессорскую кафедру в Королевском институте. О колоссальной работоспособности Фарадея можно судить по его печатному труду «Экспериментальные исследования по электричеству», выходившему отдельными сериями с 1831 по 1865 г. Издание состояло из 30 серий. Здесь выразилось умение Фарадея работать систематически. Вопросы, которые намечались для исследования, он записывал на отдельных листах и затем постепенно их разрешал. Собственноручные заметки Фарадея к его работам аккуратно пронумерованы. Последний параграф к «Экспериментальным исследованиям» имеет №... 16 041!

Убеждение в единстве сил природы — основная черта мировоззрения Фарадея. Через десять лет после опытов Эрстеда,



Фарадей Майкл
(1791-1867)
88
89
90
91
92

29 августа 1831 г., Фарадею удалось на опыте наблюдать явление электромагнитной индукции при изменении тока. При размыкании тока, проходящего через проволочную катушку, возникал кратковременный ток в параллельно поставленной второй катушке, что можно было заметить по слабым отклонениям стрелки гальванометра. В момент замыкания тока в первой катушке во второй снова возникал ток, но противоположного направления. Рисунок 90 дает схему опыта (в действительности обе катушки были намотаны на один общий деревянный сердечник). Введение внутрь катушек железного сердечника резко усиливало наблюдаемое явление. На рисунке 91 вы видите «кольцо Фарадея»: на железном кольце намотаны две катушки изолированной проволоки.

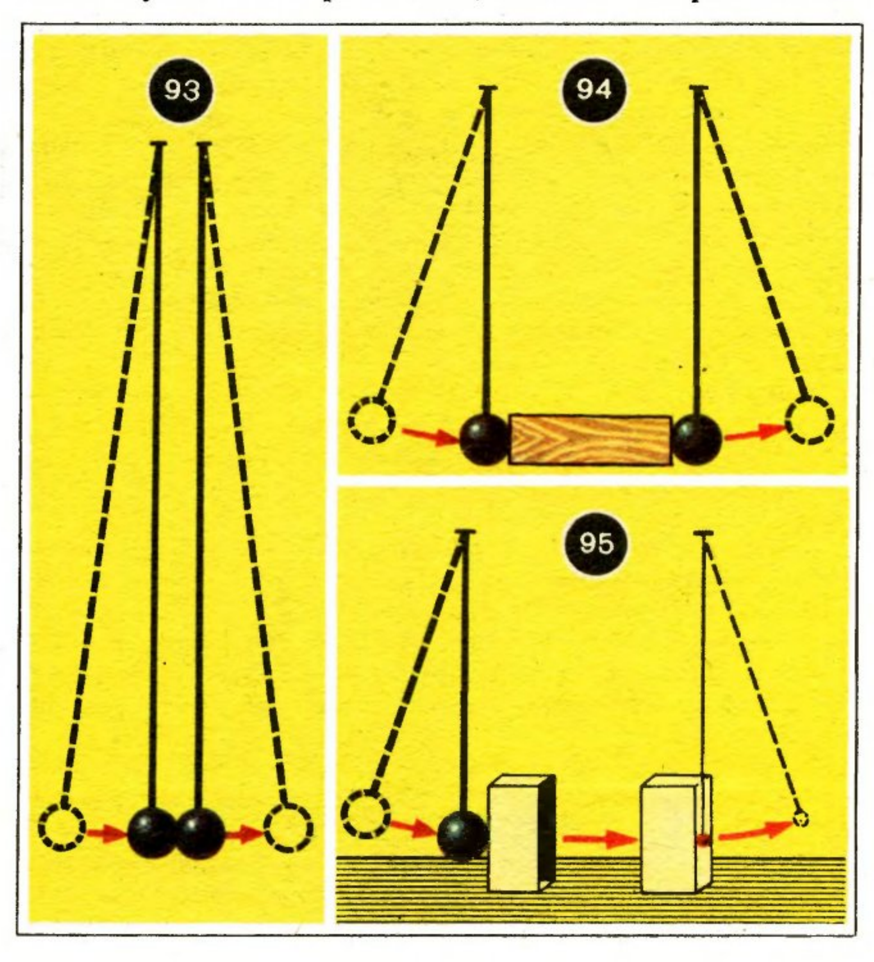
17 октября 1831 г. Фарадей решает поставленную перед собой задачу — «превратить магнетизм в электричество». «...Магнит сразу был вдвинут в катушку. Стрелка гальванометра показала мгновенное отклонение... Если магнит оставался внутри катушки, то стрелка снова приходила в свое прежнее положение и при вынимании его отклонялась в противоположном направлении» (рис. 92). В таких словах записал Фарадей сделанное им величайшее открытие.

Исторический опыт с кольцом Фарадея ставится сейчас в любой школе: замыкание тока в одной обмотке вызывает намагничивание железного кольца. Получается так, как будто во вторую обмотку вдруг вдвигается магнит. Размыкание тока сопровождается размагничиванием сердечника, что соответствует удалению магнита.

Первым после Кавендиша, труды которого еще не были опубликованы, Фарадей обратил внимание на существенное влияние среды на протекающие в ней электрические явления и взаимодействия. Фарадей отрицал возможность взаимодействия на расстоянии и утверждал, что оно происходит через некую среду («мировой эфир»).

Современные Фарадею ученые были далеки от подобного объяснения явления электромагнитной индукции. Казалось естественным, что действие одного тела на другое может передаваться на большие расстояния и притом мгновенно. У большинства ученых не возникло еще и сомнения в возможности такой передачи без какого-либо посредника. Чтобы понять неправдоподобность такого «дальнодействия» и наглядно представить роль передающего посредника, рекомендуем читателям сделать несколько опытов из области передачи механического движения. Допустим, что у вас есть два шарика, подвешенных на нитях как маятники. Как передать движение от одного шарика к другому? Это можно сделать, во-первых, непосредственно,

отведя один шарик и выпустив его так, чтобы он ударил по второму. Если шарики были одинаковые, то второй шарик будет при этом отброшен на такую же высоту, с какой упал первый, а первый шарик остановится (рис. 93). Но удар можно передать и при помощи какого-нибудь материального посредника, например через деревянный брус (рис. 94). В качестве более тонкого посредника может служить и воздух. Для опыта возьмите две картонные коробки без крышек и замените дно их туго натянутым пергаментом или плотной бумагой. Удар шариком по одной из коробок вызовет воздушную волну, и второй шарик (в этом случае он должен быть очень легким) отскочит от коробки (рис. 95). Земля притягивает находящиеся над ней тела, причем это притяжение можно наблюдать и в безвоздушном пространстве. Что же является посредником между Землей и телом в этом случае? Любой физик знает, что таким материальным по-



средником является «поле», «поле тяготения». Материальным посредником между магнитом и куском железа, удаленным от него на некоторое расстояние, является магнитное поле, между электрическими зарядами — электрическое поле.

Вводя понятие поля и отвергая теорию дальнодействия, Фарадей был убежден в материальности силовых линий, идущих от магнита или заряженного проводника. Для него силовые линии были не просто графическим изображением действия сил, а реально существующими и заполняющими все пространство вокруг магнита или заряженного проводника.

Впоследствии Максвелл идеи Фарадея облек в математическую форму. Он высоко оценил идеи Фарадея за скрытый в них глубокий математический смысл, за точность и логичность его определений. «Когда я стал углубляться в изучение работ Фарадея,— пишет он,— я заметил, что метод его понимания тоже математичен, хотя и не представлен в условной форме математических символов. Я также нашел, что метод может быть выражен в обычной математической форме и таким образом может быть сопоставлен с методами признанных математиков».

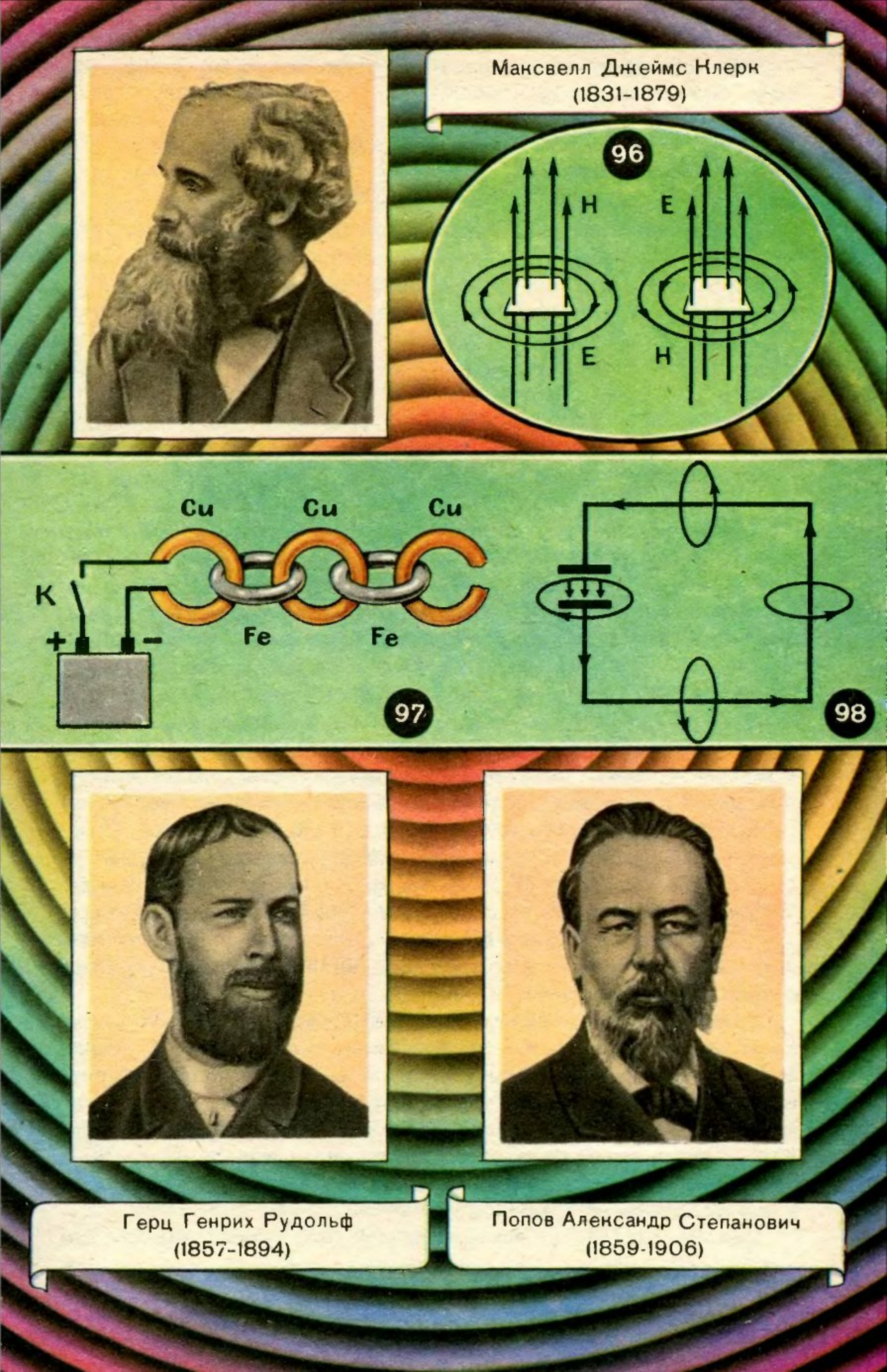
В противоположность Фарадею Максвелл, сын состоятельных родителей, получил лучшее образование, какое можно было получить в то время в Англии. Одаренный исключительными математическими способностями, он, когда еще учился в средней школе, направил в Королевское общество в Лондон свою первую работу по геометрии. В 25 лет Максвелл — профессор физики в Абердине (Шотландия), а с 1860 по 1865 г. в Королевском колледже в Лондоне.

В 1873 г. вышел в свет знаменитый «Трактат по электричеству и магнетизму» — плод восьмилетней работы Максвелла. В трактате изложена новая теория электромагнитного поля. Выведенные Максвеллом уравнения легли в основу современной электротехники и радиотехники.

К сожалению, математическая форма уравнений Максвелла требует для ее понимания большой подготовки и не позволяет в данной статье показать всю глубину и изящество заложенных в уравнениях идей. Восхищенный внутренней и внешней красотой математической формы уравнений Максвелла, немецкий физик Больцман выразил свой восторг стихами, начинавшимися фразой:

«War es ein Gott der diese Zeichen schrieb?..»
(«Не бог ли эти знаки начертал?..»)

Из четырех уравнений Максвелла, которые обычно приводятся в учебниках высшей школы, остановимся только на двух, имеющих непосредственное отношение к физике средней школы.


Максвелл Джеймс Клерк
(1831-1879)
96
H
E
E
H
Cu
Cu
Cu
K
+
-
Fe
Fe
97
98
Герц Генрих Рудольф
(1857-1894)
Попов Александр Степанович
(1859-1906)

Для электромагнитного поля (в отсутствие проводников) они могут быть представлены так:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$ — уравнение электродвижущей силы;

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{dN}{dt}$$ — уравнение магнитодвижущей силы,

где $\vec{E}$ — напряженность электрического поля на участке dl, $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля на участке dl, N — поток электрической индукции, Φ — поток магнитной индукции, t — время.

Бросается в глаза симметричный характер уравнений, устанавливающих: первое — связь электрических и магнитных явлений, второе — аналогичную связь магнитных явлений с электрическими.

Физическую сущность этих двух уравнений можно выразить популярно следующими двумя положениями:

1. Изменение электрического поля всегда сопровождается магнитным полем.

2. Изменяющееся магнитное поле всегда сопровождается электрическим полем.

Рисунок 96 наглядно иллюстрирует эти положения. Вспомните известные опыты. Изменяя магнитное поле, вдвигая и выдвигая магнит в катушку (или замыкая и размыкая ток во внутренней катушке), всегда получаем в последней электрический ток. Впрочем, приведенные рисунки имеют существенный недостаток — замкнутыми показаны только силовые линии электрического поля или линии напряженности магнитного поля в отдельности. Более точную наглядную иллюстрацию уравнений Максвелла предложил английский физик Брэгг в виде воображаемой модели, известной под названием «цепочка Брэгга». Представьте себе цепочку, сделанную из чередующихся медных и железных колец (рис 97). Замыкая на мгновение ключ K, мы посылаем ток от батареи в первое медное кольцо. Следующее, сделанное из железа кольцо намагничивается. Возникновение магнитного поля в нем вызывает индукционный ток в третьем кольце. Этот ток вызовет магнитное поле в четвертом и т. д.

Замкнутость магнитных и электрических силовых линий электромагнитного поля — весьма важное положение в теории Максвелла. Чтобы иметь возможность во всех случаях говорить о замкнутом — вихревом — характере поля, Максвелл ввел понятие «ток смещения», который как бы замыкает через диэлектрик электрический контур (при наличии в цепи конденсатора). Магнитные силовые линии окружают ток смещения, так же как и ток проводимости (рис. 98).

Максвелл в своих математических формулах показал, что наличие вещественных носителей (металлических колец в моде-

ли Брэгга), металлических проводов на практике не является существенным для распространения электромагнитного поля. Замкнутые на себя магнитные и электрические поля распространяются от источника (излучаются) по направлению радиусов («радиус» и значит «луч») во всех направлениях.

Электромагнитное поле материально. Физика знает две формы материи — вещество (твердое, жидкое или газообразное) и поле (электромагнитное, гравитационное, внутриядерное). Скорость распространения электромагнитного поля, как теоретически установил Максвелл, равна скорости распространения света. Отсюда у Максвелла возникла идея, что и свет представляет собой электромагнитное поле. Электромагнитная теория света сменила предшествующую ей теорию Гюйгенса, который рассматривал свет как колебание эфира. «Электромагнитное поле — это та часть пространства, которая содержит в себе и окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии», — писал Максвелл. Материальность электромагнитного поля подтверждается тем, что в нем наблюдается действие сил, тем, что оно является носителем и передатчиком энергии. Эта материя всегда налицо, так как если откачать насосом обычную, вещественную материю (Максвелл называет ее «грубой» материей или «сгущенной» материей), то останется «тончайшая» материя, способная передавать электрические или световые действия.

Наука XX в. окончательно отбросила противоречивое понятие светового эфира, хотя в разговорной речи до сих пор сохранились выражения «волны эфира», «передача в эфире», когда речь идет о радиовещании и когда в сущности мы имеем дело с колебательными явлениями в электромагнитном поле.

Максвеллу не удалось дожить до того времени, когда его идеи получили практическое подтверждение, он умер в расцвете творческих сил в 1879 г. в возрасте 48 лет.

В 1888 г. Герц экспериментально получил электромагнитные волны, в 1895 г. А. С. Попов применил электромагнитные волны для передачи и приема сигналов без проводов.

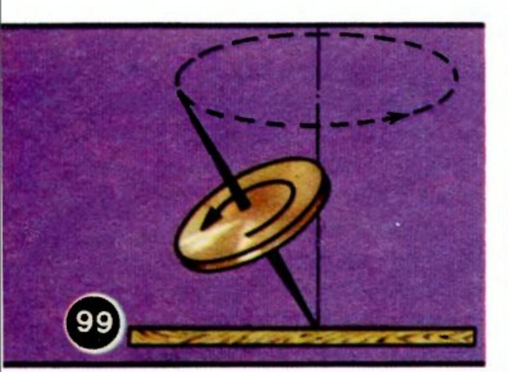
ВОЛЧОК И МАГНИТ

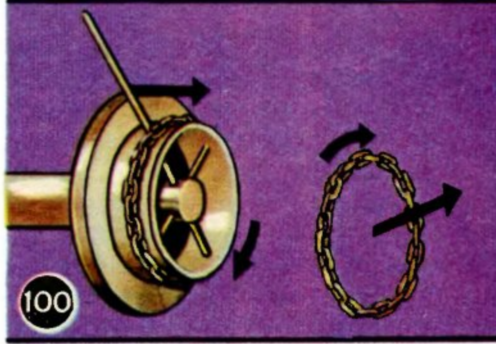
Запустили волчок! Вы любуетесь его кружением, удивляетесь его устойчивости, и вам хочется разгадать его тайну. Почему неподвижный волчок не может стоять на острие своей оси, а приведи его в быстрое движение — и, словно перед тобой совсем другой предмет, он стойко держится, вращаясь вокруг вертикальной оси? Мало того, волчок упорно сопротивляется попыткам вывести его из этого положения. Попытайтесь, толкнув его, вывести волчок из вертикального положения, опрокинуть, но волчок и

после толчка продолжает кружиться, описывая своей осью коническую поверхность (рис. 99).

На рисунке 100 показан удивительный опыт с вращающейся цепью. Заставить ее стоять, как твердый обруч, покажется смешной фантазией, но сообщите цепи быстрое вращение, надев ее на вращающийся шкив, и затем сдвиньте в сторону, дайте ей соскользнуть на стол, и она «побежит» по столу так же, как если бы была твердым кольцом.

Механика дает объяснение этому удивительному явлению. Для этого надо знать закон сохранения момента импульса. В I части «Бесед» мы говорили об импульсе и законе его сохранения для поступательного движения ($p = mv = \text{const}$). Для вращательного движения справедлив закон сохранения момента импульса: $L = I\omega = \text{const}$, где L — момент импульса; I — момент инерции, характеризующий инерцию вращательного движения,





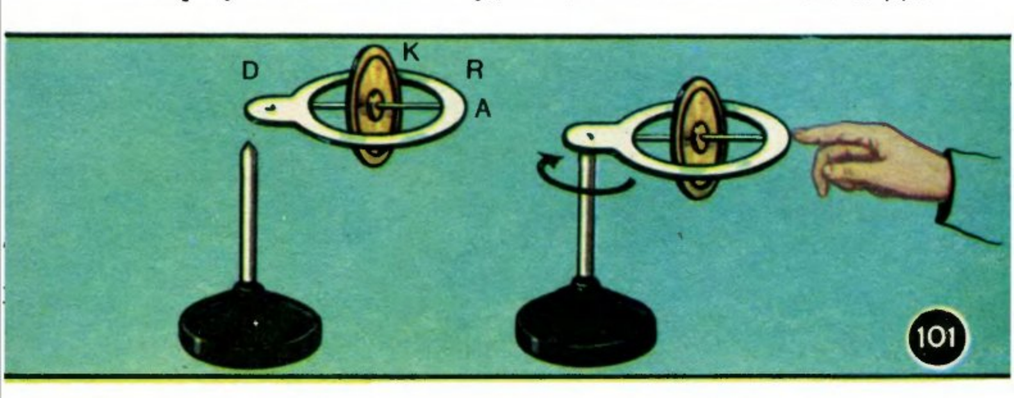
ω — угловая скорость (см. I часть, беседу «Интересные и полезные параллели»). Только под действием внешних сил, например трения, катящаяся цепочка может уменьшить скорость вращения и тогда, потеряв форму, упадет на стол. То же относится и к волчку.

Мы познакомились с одним свойством волчка — сохранением направления оси волчка. Обратимся ко второму важному его свойству. Лучше всего оно обнаруживается в следующем опыте (рис. 101). Сплошная латунная шайба K с утолщенным ободом надета на стальную ось A, вокруг которой она может вращаться внутри латунного кольца R. Если намотать на ось шнурок и быстро потянуть его, то шайба придет в быстрое вращение. Прилив D на кольце R имеет снизу углубление, которым весь волчок может быть надет на стальное острие штатива. Если при этом не поддерживать прибор рукой, то он под действием силы тяжести опрокинется и упадет. Если же, прежде чем убрать руку, привести прибор во вращение, то ось волчка с его кольцами как

бы повиснет в горизонтальном положении, причем вся система будет поворачиваться вокруг вертикальной оси штатива. Это вращение получило название прецессии. Прецессия возникла как результат действия силы тяжести и стремления вращающегося волчка сохранять направление оси.

В 1852 г. французский физик Фуко обнаружил, что горизонтальная ось вращающегося волчка устанавливается в направлении север — юг, подобно магнитной стрелке компаса. С той разницей, что ось волчка устанавливается в плоскости географического меридиана, а стрелка компаса в плоскости магнитного меридиана, который, как известно, не совпадает с географическим. Да это и лучше, так как практически важно географическое направление и подобного рода волчком (в этом случае он называется гироскопом) можно пользоваться вместо компаса.

Попробуем объяснить это удивительное свойство волчка. Для



простоты представим, что наш гироскоп расположен на экваторе в точке *A* (рис. 102), причем его ось ориентирована с востока на запад. Так как Земля вращается, то через некоторое время точка *A* перейдет из положения *1* в положение *2*. Ось гироскопа, как мы знаем, стремится сохранить прежнее направление, но действие силы тяжести приводит ее снова в горизонтальное положение. Совместное действие силы тяжести и вращения вызывает прецессию. Ось поворачивается до тех пор, пока не установится параллельно земной оси, в плоскости меридиана с севера на юг. После этого прецессия прекращается, так как при продолжающемся вращении Земли ось гироскопа будет перемещаться параллельно самой себе, а прецессия наблюдается при попытке изменить направление оси. Все вращающиеся тела, например маховые колеса двигателей, стремятся повернуть свои оси по направлению к Полярной звезде.

Для умелых рук на рисунке 103 дана схема интересной самоделки, подтверждающей принцип гироскопического компаса.

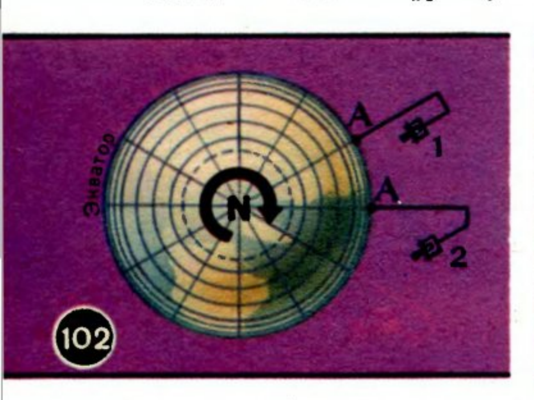
Запустите при помощи шнурка волчок, и вы увидите, что ось его повернется в направлении север—юг.

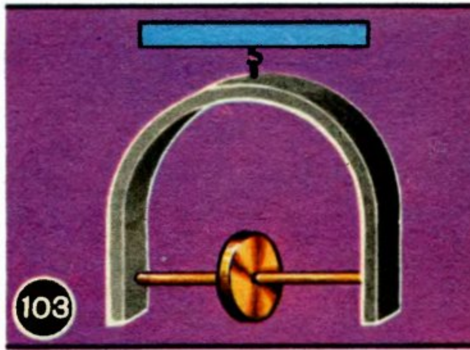
Какое же отношение имеет все сказанное к магниту? Самое прямое. Об этом будет рассказано ниже.

Тысячелетиями люди удивлялись чудесным свойствам магнита, но не могли разгадать его тайну, так как не знали законов волчка и строение атома.

Первое научное сочинение о магнетизме принадлежит английскому врачу Гильберту, написавшему в 1600 г. книгу «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле». Здесь впервые уточняется понятие полюсов магнита, а также делается попытка понять строение магнита: если разделить магнит на части, то получится множество маленьких магнитов. Следовательно, магнит состоит из множества маленьких магнитиков.

Только в 1785 г. французский военный инженер Кулон,





используя изобретенные им крутильные весы, исследовал взаимодействие магнитных полюсов и доказал, что оно подчинено закону обратных квадратов расстояния.

Однако природа магнита продолжала оставаться таинственной. Только аналогия притяжения и отталкивания магнитных полюсов и электрических зарядов наводила на мысль о родстве этих двух явлений. Лишь после обнаружения Эрстедом на опыте действия электрического тока на магнитную стрелку и уточнения Ампером законов этого действия мысль о взаимосвязи электричества и магнетизма была подтверждена. Ампер выдвинул теорию, по которой магнит состоит из маленьких, элементарных круговых токов, но круговой ток, как известно, обладает магнитными полюсами (рис. 104; напомним также рис. 81). Фарадей и Максвелл разработали учение о магнитном поле.

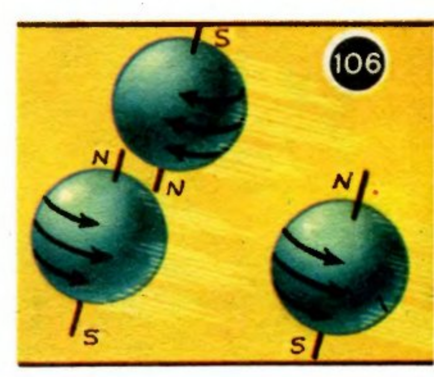
Со времен Ампера прошло более 150 лет, и вот в свете современной физики оказалось, что амперовы элементарные токи действительно существуют. Это электроны, обращающиеся вокруг

атомных ядер в каждом атоме каждого вещества (рис. 105). Но тогда каждое вещество должно обладать магнитными свойствами, ведь электроны обращаются вокруг ядер в любом теле: дальше вы узнаете, что магнетизм — это свойство движущихся электронов и, следовательно, он присущ каждому веществу: и твердому, и жидкому, и газообразному. Вопрос этот не так прост.

Еще Фарадей установил, что все вещества можно разделить на две группы — парамагнитных и диамагнитных веществ и что нет материалов, безразличных к магнетизму. Правда, магнитные свойства большинства тел очень слабо выражены и для их обнаружения приходится воздействовать очень сильными магнитными полями на маленькие и легкие образцы исследуемых материалов. Подвешивая стержень из висмута между полюсами сильного электромагнита, можно увидеть, что стержень устанавливается перпендикулярно направлению линий индукции магнит-





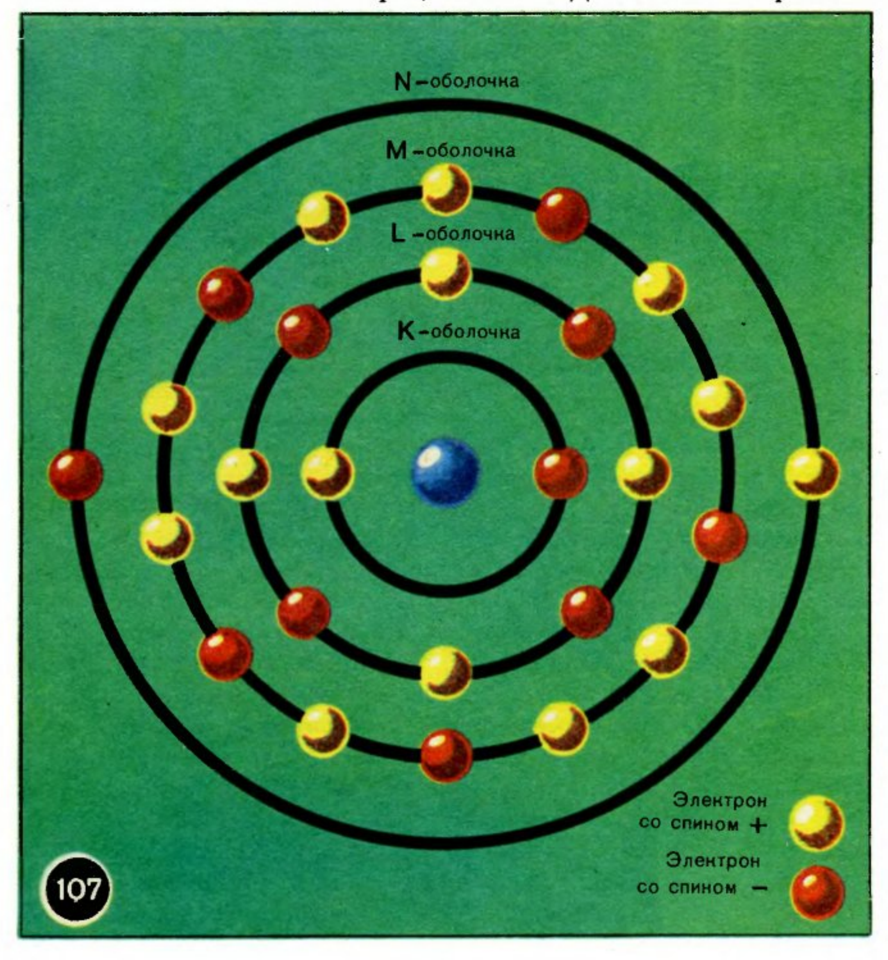


ного поля, тогда как стержень из алюминия располагается параллельно этим линиям. Висмут диамагнитен, алюминий парамагнитен (в переводе с греческого *пара* — значит *вдоль, диа — поперек, через*).

Лишь в наши дни явления диа- и парамагнетизма получили свое объяснение в электронной теории. Начнем с диамагнетизма. Его происхождение связано с движением электронов вокруг ядра атома по орбите (назовем это движение орбитальным). Электрон, обращающийся вокруг ядра, можно уподобить волчку, и подобно тому как поле тяготения вызывает прецессию волчка, противодействующую силе тяжести, так внешнее магнитное поле вызывает прецессию вращающегося вокруг ядра электрона, противодействующую магнитному полю. Так как в любом атоме любого вещества происходит орбитальное движение электронов, то диамагнетизм свойствен всем видам вещества. Но диамагнитные свойства очень слабы и во многих случаях они перекрываются парамагнитными свойствами. От чего же зависят парамагнитные

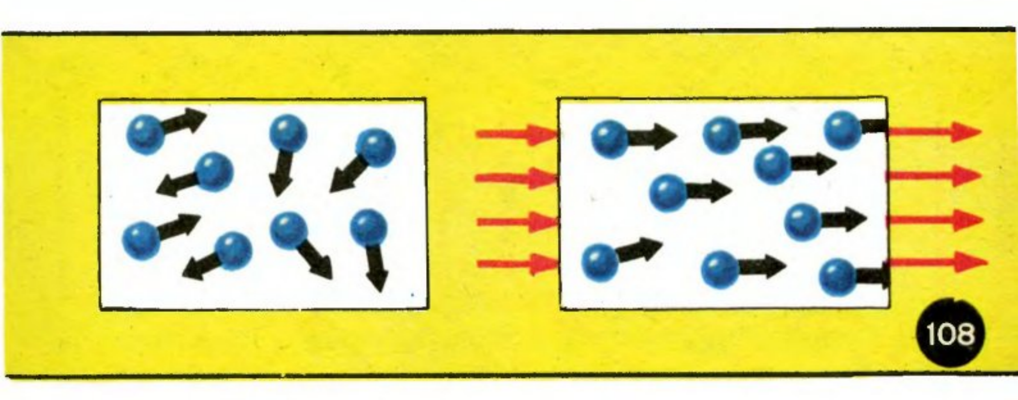
свойства? Дело в том, что, кроме орбитального движения, электронам присуще еще и вращательное движение вокруг их собственной оси. Для наглядности принято сравнивать движение электрона вокруг собственной оси с движением Земли вокруг оси (при одновременном ее движении по орбите вокруг Солнца). Таким образом, электрон уподобляется волчку, и его движение получило название «спин» (от английского глагола to spin — запускать волчок). Надо при этом иметь в виду, что это всего лишь полезный, наглядный образ. Современная физика отказалась от представления об электроне, как о каком-то вращающемся шарике, однако спин все-таки существует, и мы будем пользоваться этим наглядным образом электрона-волчка, обладающего магнитными свойствами.

В зависимости от направления вращения условно различают положительный спин и отрицательный. Два спина с противо-



положными знаками друг друга «нейтрализуют» (рис. 106). Если каждому электрону с положительным спином соответствует в атоме электрон с отрицательным спином, то магнитные свойства, зависящие от спинов, нейтрализуются и остается лишь магнетизм, зависящий от орбитального движения электронов. Вещества из таких атомов диамагнитны.

Но во многих случаях числа положительных и отрицательных спинов не уравновешены, тогда атом обладает результирующим спином и соответствующим магнитным моментом. Рисунок 107 иллюстрирует схему атома железа. Электроны на оболочках *K*, *L*, и *N* спарены (эти оболочки заселены парами электронов с противоположно ориентированными спинами), тогда как на оболочке *M* имеются непарные электроны, дающие нескомпенсированный спин — спин атома. То же, только в более слабой степени, можно сказать и о любом парамагнетике.



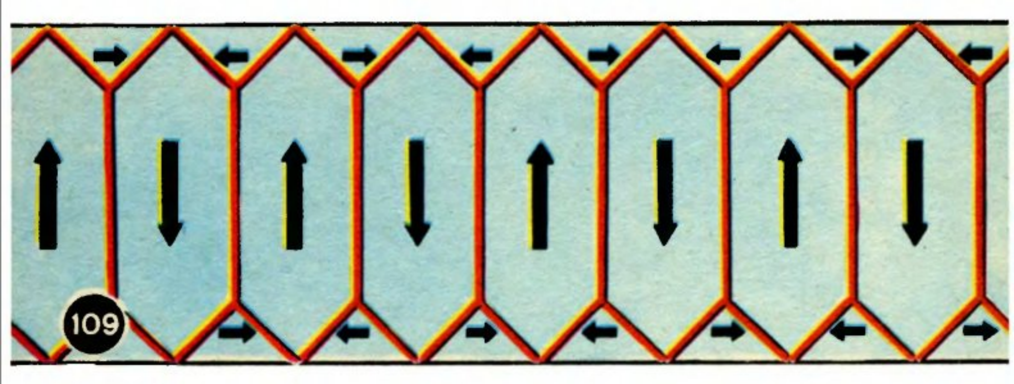
Тепловое движение приводит спины атомов в беспорядочное расположение, и парамагнитные свойства вещества обычно не проявляются (рис. 108 слева). Но если поместить такое вещество во внешнее магнитное поле, то спины атомов в результате прецессии ориентируются приблизительно вдоль линий индукции внешнего магнитного поля (как гироскоп вдоль меридиана) и вещество проявляет свойства парамагнетика (рис. 108 справа).

Особую группу составляет небольшой класс веществ — ферромагнетики, названные по их главному представителю — железу. По современной теории кристалл железа состоит из отдельных микроскопических областей (доменов), в каждой из которых спины атомов уже расположены (без участия внешнего поля) в направлении кристаллических осей (вспомните анизотропию кристаллов). В ненамагниченном железе домены ориентированы так, что суммарное магнитное поле их равно нулю (рис. 109). Поднося к куску железа магнит или помещая его в магнитное поле, мы вызываем определенную ориентацию доменов и появле-

ние магнитных свойств — железо становится магнитом. Неаккуратным обращением вы можете испортить этот магнит, если будете, например, ронять его или ударять по нему, так как при ударах наведенный порядок доменов нарушается. Наоборот, вы можете усилить магнитные свойства магнита, если замкнете его полюсы железной пластинкой, к середине которой подвесите маленькую коробочку, и будете постепенно, день за днем, добавлять в коробочку грузы (песок). Так вы сможете «воспитать» ваш магнит, и он будет поднимать значительные тяжести.

При нагревании магнит теряет свои магнитные свойства. Существует температура (температура Кюри), при которой ферромагнетик совершенно размагничивается и превращается в парамагнетик. Для железа эта температура равна 770 °C.

Магнитные качества ферромагнетиков в сильной степени зависят от примеси других веществ к железу. Это свойство исполь-



зуется в технике, когда желают получить более прочные постоянные магниты или, наоборот, материал, способный легко терять свои магнитные свойства или перемагничиваться в обратном направлении (сердечники трансформаторов, моторов, генераторов).

Технология ферромагнитных материалов использует еще особую группу материалов, называемых ферритами. Они представляют собой полупроводники и состоят из смеси оксидов железа с оксидами некоторых других металлов (марганца, кобальта, никеля, меди, магния). Порошки этих оксидов тщательно смешивают, спрессовывают и придают им различную форму (палочек, колец и др.). Ферриты обладают очень большим электрическим сопротивлением и большой магнитной проницаемостью — эти свойства и обусловливают их широкое применение. Ферритовая антенна — маленькая палочка — позволяет заменять длинные антенны в портативных радиоприемниках, транзисторах. Ферритовые кольца используют в «памяти» электронно-вычислительных машин.

СВЕТ И ГЛАЗ

Немецкому физику и физиологу Гельмгольцу принадлежит фраза: «Если бы оптик принес мне столь несовершенный инструмент, как человеческий глаз, я бы тотчас выбросил его за дверь (würde ich ihn zur Tür hinauswerfen)». С такой суровой оценкой можно было бы согласиться лишь в том случае, если судить о глазе только как об оптическом приборе. Совсем иное будет суждение, если мы будем рассматривать всю совокупность зрительного органа и будем оценивать глаз как один из основных анализаторов (в свете учения И. П. Павлова), воспринимающих действия раздражителей внешнего мира на нашу нервную систему. Чувство неудовлетворенности сменится тогда чувством изумления перед совершенной слаженностью, согласованностью во всей системе. Мы понимаем, что эта слаженность явилась в результате длительной эволюции (развития) организма и вызвана жесткой необходимостью ориентировки организма во внешнем мире. Слишком большое значение имеет для всякого живого организма действие света. Попытки природы создать орган, специально реагирующий на световой раздражитель, на протяжении миллионов лет истории органической жизни на Земле, иногда ошибочные, иногда неудачные и более или менее совершенные, можно проследить на различных ступенях развития органических форм. Рассмотрим, например, такого простого обитателя Земли, как дождевой червь. Напрасно стали бы мы искать у него привычные детали: голову, нос, глаза. Ничего подобного у него не найти. И все же дождевой червь достаточно резко реагирует на освещение. Осветите темной ночью электрическим фонариком выползшего из земли червяка — он мгновенно спрячется в свою норку. А между тем органа, который можно было бы назвать глазами, у дождевого червя нет. Имеются только разбросанные по всему телу нервные клетки, строение которых схоже со строением нервных клеток глаза более высокоорганизованных существ. Светочувствительные органы червя не локализованы, а рассеяны по всему телу, как органы осязания у человека.

Вот раскинулась изящная сеть, которую сплел паук-крестовик. Его «ученое» имя — Epeira diademata — «художник в диademe». Но где же у него бриллиантовая диадема? Рассмотрите его в лупу, и на его головогруди вы увидите восемь «алмазов» — это его глаза. Восемь глаз! Из них четыре главных и две пары подсобных. Рисунок 110 показывает строение главного (слева) и вспомогательного (справа) глаза. Это точечные глаза. Прозрачная, почти шарообразная линза направляет собранный свет на светочувствительные клетки. В зависимости от расположения

светочувствительного слоя (дальше или ближе от линзы) и кривизны линзы глаза паука приспосабливаются к дальнему (несколько миллиметров) или близкому видению. Конечно, маленькая сетчатая оболочка таких миниатюрных глаз не может содержать много светочувствительных элементов — их всего несколько тысяч вместо миллионов клеток сетчатки человеческого глаза.

А вот воздушная красавица стрекоза. На рисунке 111 изображены ее глаза. Вернее, множество глаз! Как цветок подсолнечника представляет собой соцветие тесно расположенных элементарных цветочков, так глаза стрекозы и других насекомых состоят из множества трубчатых ячеек — фасеток. Новая попытка природы создать более совершенный орган зрения! Было бы совершенно ненаучно задавать вопрос и ломать голову над тем, какие зрительные образы получают паук или стрекоза. Не представляется ли им мир мозаичным? Мы привели просто пример из бесчисленных способов решения задачи, которая стояла перед природой,— обеспечить свои создания органом восприятия света. А сколько было еще, вероятно, и более неудачных вариантов, не выдержавших конкуренции в борьбе за существование и бесследно исчезнувших, прежде чем появилось то, что нам кажется таким совершенным и прекрасным,— человеческий глаз.

Сколько волнующих слов сказали поэты о глазах, черных, голубых... Сколько художников пытались передать их очарование. Художники! Не связана ли их жизнь целиком с деятельностью глаза? Не является ли одним из наиболее драматических сюжетов трагедия слепнущего художника в романе Киплинга «Свет погас»? Однако ведь речь должна идти о физике. Да. Но разве не связан с глазом весь раздел «Геометрическая оптика», которой мы собираемся посвятить эту статью? Конечно! Основное понятие геометрической оптики — луч. Пронизывающие чащу леса или вырывающиеся из-за туч потоки света действительно создают представление о лучах. В темном зрительном зале кинотеатра из окошечка кинобудки вырывается сноп света, воспринимаемый нами как расходящийся конус лучей. Но, конечно, это не собрание лучей, это пучки света, а луч — это идеализированное понятие, геометрическая линия. Пучок света — это физика, луч — геометрия. Геометрическое понятие прямой линии тесно связано с понятием луча, а значит, со свойством нашего глаза. Когда плотник проверяет прямолинейность кромки оструганной доски, он смотрит вдоль нее по лучу зрения (рис. 112). Образование теней и солнечных пятен связано с прямолинейным распространением световых пучков. Сквозь малые отверстия в густой листве деревьев прорываются пучки света, образуя под деревом пятна одинаковых очертаний — круглые, если падают на перпен-

дикулярно поставленную поверхность, и овальные при косом падении на землю.

О Солнце! Там, где тень от лип густа и ароматна,
Кидаешь ты такие пятна,
Что жалко мне ступать по ним.

(Э. Ростан.)

Солнечные пятна представляют собой изображения Солнца, получившиеся при прохождении пучка света через малые отверстия. Камера-обскура — исстари известный оптический прибор (рис. 113). Для получения четких изображений необходимо только подобрать размер отверстия. Уменьшение его ведет к получению более отчетливых изображений, так как узкие пучки света от отдельных точек предмета не накладываются друг на друга. На рисунке 114 показана фотография, полученная при помощи простейшего безобъективного аппарата. Однако надо иметь в виду, что при чрезмерном уменьшении отверстия изображение снова становится туманным. Здесь кончается геометрическая оптика и проявляется волновая природа света. Речь идет о дифракции (мы поговорим о ней в другой беседе).

Впрочем, человеческий глаз тоже представляет собой устройство, по принципу действия схожее с фотоаппаратом. Из рисунка 115 видно сходство того и другого инструментов. Через зрачок — отверстие в радужной (окрашенной) оболочке глаза, которое, подобно диафрагме фотоаппарата, может сужаться или расширяться, в зависимости от яркости освещения, лучи света проходят через хрусталик и дают изображение на сетчатой оболочке глаза.

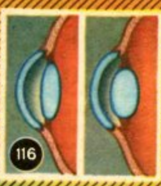
Как изменится изображение на фотографической пластинке или на экране при показе диапозитивов при помощи проекционного фонаря, если закрыть половину объектива?

Спрашиваемый часто попадает впросак, отвечая, что останется только половина изображения. Ни в коем случае! Вы легко убедитесь в этом на опыте.

Диафрагма позволяет получить только более резкое изображение, способствует увеличению резкости изображения на сетчатке, а следовательно, и более отчетливому видению и сужению зрачка нашего глаза. Вот интересное подтверждение этому: не прибегая к лупе, можно разобрать мелкую печать, если страница ярко освещена солнцем. Яркое освещение заставляет зрачок суживаться, и изображение становится более резким. Люди, читающие обычно в очках (дальнозоркие), могут в случае необходимости прочитать написанное без очков. Оставив маленькую дырочку между сжатыми пальцами, надо смотреть одним глазом


110


111


116


115
P


117

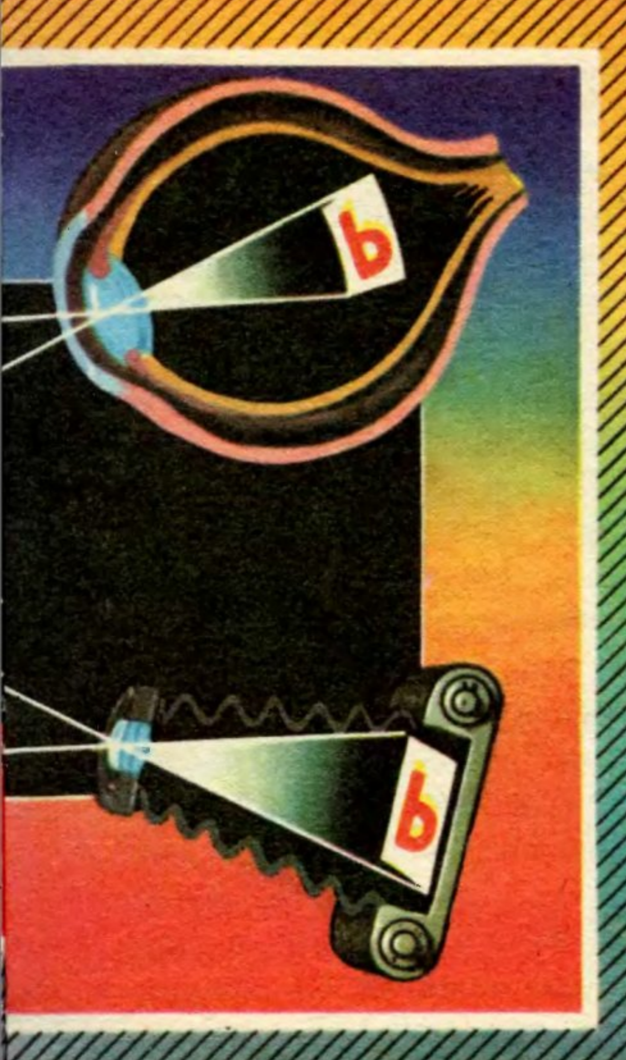


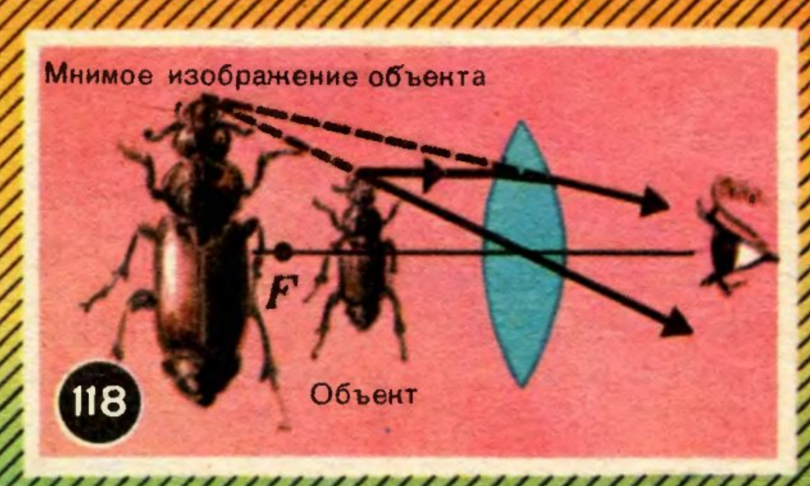

120

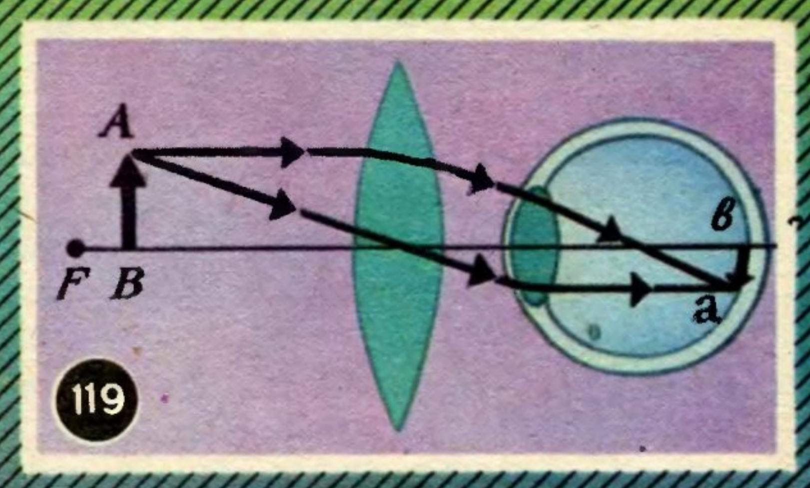

112

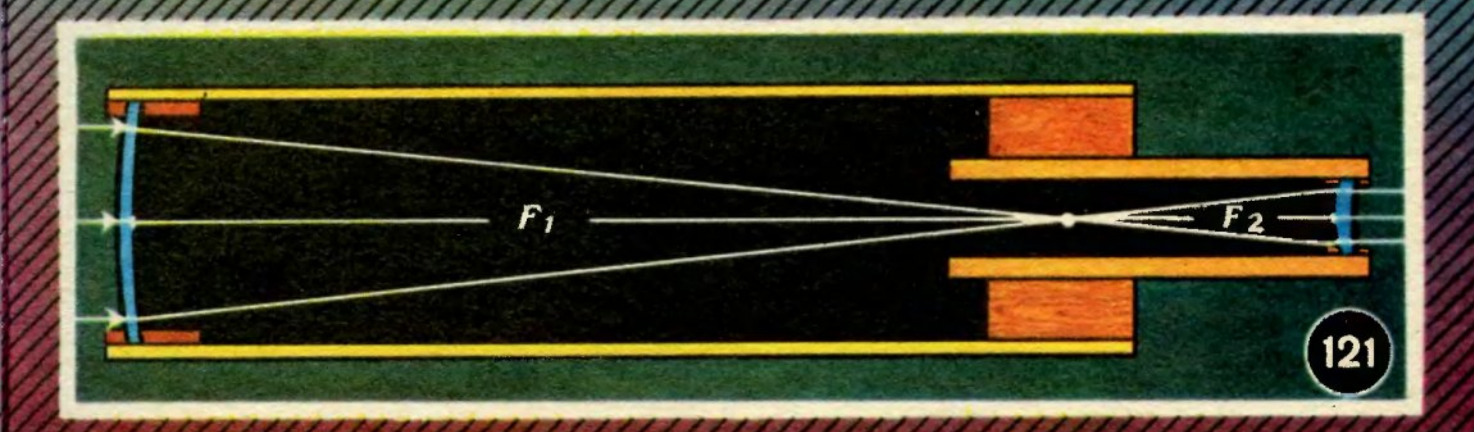

113


114


ь
ь


Мнимое изображение объекта
F
Объект
118


A
F B
в
a
119


F_1
F_2
121

на страницу, зажмурив при этом другой. Тогда из туманных строчек страницы выступит отчетливо видимая часть строки.

Посмотрите сбоку на человеческий глаз. Вы заметите выпуклость. Это роговая оболочка. За ней расположена радужная оболочка. Между роговой и радужной оболочкой находится «водянистая жидкость», далее хрусталик, и, наконец, студенистое «стекловидное тело», которые образуют оптическую систему глаза. Подобно фотоаппарату, глаз наводится на резкость, и на сетчатке получается четкое изображение рассматриваемого предмета. Это достигается изменением кривизны хрусталика (рис. 116). Окружающие хрусталик мышцы могут сжимать или растягивать хрусталик и тем самым изменять в известных пределах его фокусное расстояние.

Сходство в получении зрительных изображений в глазу с фотографическим процессом мы находим и в химических явлениях на сетчатке. Они аналогичны процессам, которые происходят в светочувствительной эмульсии пленки. На фотографической пленке световое изображение снимаемого предмета вызывает разложение бромида серебра в светочувствительном слое. В глазу под действием света происходит разложение (обесцвечивание) особого вещества — зрительного пурпура, приготовляемого светочувствительным слоем сетчатки (пигментным эпителием). Более яркие места светового изображения вызовут большее разложение пурпура, темные — меньшее. Вследствие этого на сетчатке, как и на фотопленке, получается изображение. Однако оно держится недолго, всего $^1/_7$ с, после чего исчезает. Взамен использованного пурпура пигментный эпителий приготовляет новый слой и т. д.

На задаваемый обычно вопрос, почему мы не видим предметы «вверх ногами», раз изображение на сетчатке получается обратное, можно было бы и не отвечать, так как этот вопрос содержит в себе ошибку. Самый короткий ответ был бы тот, что мы видим не изображение на сетчатке (которое действительно обратное), а предметы во внешнем мире. Что такое верх и низ? Это понятия относительные. Люди, находящиеся на противоположной стороне земного шара, по отношению к нам ходят «вверх ногами». Бесспорным, выработанным всей практикой жизни будет определение направления «вниз» как направления силы тяжести. Поднимая руку и совершая при этом работу против силы тяжести, вы указываете рукой вверх. Практика позволяет вам всегда устанавливать, где верх, а где низ предметов. Это одна из тех поправок, которые опыт и мозговая деятельность вносят в расшифровку зрительных впечатлений.

Позаимствуем из прекрасной книги академика С. И. Вавилова «Глаз и Солнце» другой пример корректирующей деятель-

ности мозга. Рисунок 117 изображает фотографический снимок лежащего человека. Подметки его ботинок, расположенные к аппарату ближе всего, вышли карикатурно большими. Оптически снимок правилен, но взгляните на действительно лежащего в такой позе человека, в вашем сознании такого карикатурного образа не получится. Оптическое изображение будет исправлено деятельностью мозга.

Изучая различные оптические системы, мы схематически изображаем ход лучей и делаем построение предмета и его изображения. При этом нередко говорят о том, что через оптическую систему мы рассматриваем мнимое изображение предмета. Вспомним привычное объяснение получения изображения от предмета, помещенного между главным фокусом и линзой. Мнимое изображение в этом случае получится там, где пересекутся продолжения расходящихся лучей, попадающих в глаз (рис. 118).

Как это понимать? Ведь мнимое изображение не может быть запечатлено ни на фотографической пластинке, ни на экране, ни, в частности, на сетчатке глаза.

Рассмотрим подробнее ход лучей от предмета. Расходящиеся после прохождения линзы световые лучи фокусируются оптической системой глаза на сетчатке (рис. 119). В результате мы получаем зрительное впечатление. При изменении положения предмета оптическая система глаза все равно будет фокусировать лучи на сетчатке. Только для этого хрусталику потребуется изменить свою кривизну (это делают мышцы, окружающие хрусталик). Такое приспособление глаза к разным расстояниям до рассматриваемых предметов называется аккомодацией.

Но как быть с изображением в плоском зеркале? В любом учебнике физики приводится чертеж образования мнимого изображения за плоским зеркалом. Чертеж правилен. Но вы сейчас смотрите только на чертеж, а не в зеркало. На чертеже получилось мнимое изображение. Значит, его нельзя получить на экране, на фотографической пластинке, на сетчатке глаза. Проверяли ли вы это на опыте? Если не проверяли, то сделайте следующий опыт.

Поставьте против окна зеркало, между зеркалом и окном — двояковыпуклую линзу. Передвигая лист белой бумаги, вы очень скоро сумеете получить перевернутое изображение окна. Вы хотите получить свой автопортрет. Пожалуйста, вы можете сфотографироваться в зеркале. А так как глаз подобен фотокамере, то, следовательно, и на сетчатке глаза получается действительное, а не мнимое изображение предметов, отражающихся в зеркале. Ход лучей, поясняющий сказанное, вы увидите на рисунке 120.

Необходимо сделать еще несколько замечаний, касающихся геометрической оптики. Допустим, вы рассматриваете в лупу мелкую печать. Вы приближаете глаз и лупу к бумаге до тех пор, пока не получите наиболее ясное изображение. В этот момент хрусталик аккомодирован на «расстояние наилучшего зрения». Это расстояние обычно принимают равным 25 см, хотя у разных лиц и в разном возрасте способность к аккомодации различна. Хотите знать, во сколько раз увеличивает лупа? Если хрусталик аккомодирован на расстояние наилучшего зрения, то ответ дает формула:

$$\Gamma = \frac{25}{F} + 1,$$

где Г — увеличение лупы, F — фокусное расстояние, измеряемое в сантиметрах. При ненапряженном глазе увеличение, даваемое лупой, равно

$$\Gamma = \frac{25}{F}.$$

Но как определить F? В солнечный день это можно сделать, собрав лучи солнца в фокус и измерив расстояние от лупы до него. Если солнца нет, то надо навести линзу на далекий предмет (ландшафт за окном) и получить резкое его изображение на бумаге. Расстояние от линзы до изображения можно считать практически равным фокусному расстоянию. Действительно, в формуле линзы

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

для далеких предметов ($d = \infty$) дробь $\frac{1}{d}$ исчезающе мала, и тогда $\frac{1}{f} = \frac{1}{F}$, или $f = F$ (расстояние до изображения равно фокусному расстоянию линзы).

Описанный прием нахождения фокусного расстояния двояковыпуклой линзы позволит решить еще одну интересную и полезную задачу. Пусть вы задумали построить себе самодельный телескоп из очковых стекол. Но тогда понадобится прежде всего знать номер очков (для дальнозорких). Номер очков показывает их оптическую силу, или величину, обратную фокусному расстоянию:

$$D = \frac{1}{F}.$$

Оптическая сила выражается в диоптриях. 1 дптр — это оптическая сила линзы, у которой $F = 1$ м. Поэтому, измерив F выше-

описанным путем, вы определите и номер очков. Например, если $F=50$ см$=0,5$ м, то $D=\frac{1}{0,5\text{ м}}=2$ дптр, или номер очков $+2$.

Для изготовления телескопа вам понадобится для объектива стекло $+2$ или $+1$, т. е. линза с фокусным расстоянием 50 или 100 см. Можно вместо очкового стекла приобрести в магазине фототоваров соответствующую насадочную линзу для фотоаппарата. Для окуляра надо взять какую-нибудь сильную линзу с фокусным расстоянием ≈ 2 см. Тогда телескоп будет увеличивать в $\frac{F_1}{F_2}=\frac{50}{2}=25$ раз. Объектив и окуляр укрепите в раздвижной картонной трубке (рис. 121), внутреннюю поверхность которой надо вычернить тушью. Исключительно важно сделать для телескопа держатель (можно использовать штатив для фотоаппарата). Если вы вздумаете вести астрономические наблюдения без держателя и подставки, держа телескоп в руках, то, кроме огорчения, ничего не получится. Невольные дрожания рук вызовут дрожание изображения, и притом увеличенные тоже в 50 раз. Настоящие телескопы имеют более сложные окуляры и объективы, свободные от хроматической аберрации (радужной окраски по краям изображения), которая в вашем телескопе будет неизбежно портить изображение.

Для суждения о размерах предмета и для лучшего различения его подробностей важен «угол зрения» — угол между лучами, проведенными от крайних точек предмета к центру хрусталика. Чтобы сделать видимыми неразличимые ранее детали, надо подойти ближе к предмету. Тогда угол зрения и изображение на сетчатке увеличатся. Насколько близко можно подойти к предмету? Для нормального глаза это определяется расстоянием наилучшего зрения — 25 см. При меньших расстояниях глаз с трудом аккомодирует, а без аккомодации он видит лишь размытое изображение. Но выпуклость глаза можно усилить, поставив перед ним двояковыпуклую линзу. Это позволит приблизить глаз к предмету и получить резкое изображение без аккомодирующего усилия. В этом и состоит назначение лупы — она позволяет увеличить угол зрения. Ну, а если подойти близко к предмету нельзя, например если вы хотите рассматривать подробности лунного пейзажа? Тогда получают изображение Луны при помощи объектива. И хотя изображение во много раз меньше Луны, вы можете приблизить к нему глаз на расстояние наилучшего зрения или, применив в качестве лупы окуляр, еще ближе и увидеть в телескоп те заманчивые объекты, о которых вы читали в книгах по астрономии, — горные цепи, отдельные кратеры, моря.

МИР ЗВУКОВ И КРАСОК

Мир звуков и красок!
До-ре-ми-фа-соль-ля-си...

Красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый...

Гамма звуков и спектр цветов... Существуют ли они независимо от уха и глаза? Только ли это субъективные ощущения, и тогда мир сам по себе беззвучен и бесцветен, или это отражение реальной действительности в нашем сознании? Если второе, то и без нас мир будет сверкать всеми красками света и звенеть симфонией звуков. Эта беседа — попытка дать вам ответ на поставленный вопрос.

Семь тонов в гамме и семь цветов в спектре! Почему семь? Почему одно и то же число?

Гамма старше спектра. Еще Пифагору (582—500 гг. до н. э.) легенда приписывает открытие числовых отношений, соответствующих разным музыкальным звукам. Проходя мимо кузницы, где несколько рабочих ковали железо, Пифагор подметил, что звуки находятся в отношении квинты, кварты и октавы. Войдя в кузницу, он убедился, что молот, дававший октаву, сравнительно с наиболее тяжелым молотом имел массу, равную $^1/_2$ массы последнего, молот, дававший квинту, имел массу, равную $^2/_3$, а кварту — $^3/_4$ массы тяжелого молота. По возвращении домой Пифагор повесил струны с грузами, массы которых пропорциональны числам $^1/_2$, $^2/_3$, $^3/_4$, на концах и нашел будто бы, что струны при ударе давали те же музыкальные интервалы. Физически легенда не выдерживает критики, наковальня при ударах различными молотами издает свой собственный один и тот же тон, да и законы колебания струн не подтверждают легенду. Но во всяком случае легенда говорит о давности учения о гармонии. Заслуги пифагорийцев в области музыки несомненны. Им принадлежит мысль об измерении тона звучащей струны путем измерения ее длины. Им был известен прибор «монохорд» — ящик из кедровых досок с одной натянутой струной на крышке. Если ударить по струне, она издаст один определенный тон. Если разделить струну на два участка, подперев ее трехгранной колкой посередине, то она будет издавать более высокий тон. Он звучит настолько схоже с основным тоном, что при одновременном звучании они почти сливаются в один тон. Отношение двух тонов в музыке — интервал. При отношении длин струн, равном $^1/_2:1$, интервал называется октавой. Известные Пифагору интервалы квинта и кварта получаются, если колку монохорда сдвинуть так, чтобы она отделяла соответственно $^2/_3$ или $^3/_4$ длины струны.

Что касается числа семь, то оно связано с каким-то еще более древним и таинственным представлением людей полурелигиозного, полумистического характера. Наиболее вероятно, что это связано с астрономическим делением лунного месяца на четыре семидневные недели. Это число фигурирует в течение тысячелетий в различных преданиях. Так, мы находим его в древнем папирусе, который за 2000 лет до нашей эры написал египтянин Ахмес. Этот любопытный документ озаглавлен так: «Наставление к приобретению знания всех тайных вещей». Среди прочего находим там таинственную задачу под названием «Лестница». В ней говорится о лестнице чисел, представляющих собой степени числа семь: 49, 343, 2 401, 16 807. Под каждым числом иероглиф-картина: кошка, мышь, ячмень, мера. Папирус не дает ключа к разгадке этой задачи. Современные истолкователи папируса Ахмеса расшифровывают условие задачи так: «У семи лиц есть по семь кошек, каждая кошка съедает по семи мышей, каждая мышь может съесть семь колосьев ячменя, из каждого колоса может вырасти по семь мер зерна. Сколько зерна сберегут кошки?» Чем не задача с производственным содержанием, предложенная 40 веков назад?

Семь тонов насчитывает современная европейская музыкальная гамма, но не во все времена и не у всех народов была гамма из семи тонов. Так, например, в Древнем Китае употреблялась гамма из пяти тонов.

Рисунок 122 изображает часть клавиатуры рояля. Каждый тон обозначен соответствующей буквой, и каждому отвечает определенная частота колебаний. Если известен один какой-то тон этого ряда, то остальные могут быть получены из него. В целях единства настройки высота этого контрольного тона должна быть строго декларирована международным соглашением. В качестве такого основного тона с 1938 г. принят тон, соответствующий частоте 440 Гц (440 колебаний в секунду). Отправным тоном является тон a', даваемый небольшим камертоном. Хотите увидеть этот тон? Это очень просто можно сделать, надо только провести ножкой (ветвью) звучащего камертона по закопченному стеклу. Получится волнообразная линия, известная в математике под названием синусоиды. Несколько тонов, звучащих одновременно, образуют музыкальный аккорд. Люди, обладающие абсолютным слухом, могут в аккорде слышать отдельно взятые тона.

Вам известно строение человеческого уха. Кратко напомним его. Ухо состоит из трех частей: 1) наружное ухо, оканчивающееся барабанной перепонкой; 2) среднее ухо, которое при помощи трех слуховых косточек: молоточка, наковальни и стремечка — передает колебания барабанной перепонки внутреннему



В МИРЕ ЗВУКОВ
1/2
2/3
3/4
220,00
293,66
440,00
c d e f g a h c' d' e' f' g' a


И КРАСОК
7
450
500
550
600
700
G
F
E
D₂D₁
C B A
880,00
1174,66
1760,00
c³ d³ e³ f³ g³ a³ h³

уху; 3) внутреннее ухо, или лабиринт, состоящее из полукружных каналов и улитки. Улитка является звуковоспринимающим аппаратом. Внутреннее ухо заполнено жидкостью (лимфой), приводимой в колебательное движение ударами стремечка по перепонке, затягивающей овальное окошечко в костяной коробочке лабиринта. На перегородке, делящей улитку на две части, по всей ее длине расположены поперечными рядами тончайшие нервные волокна постепенно возрастающей длины. Гельмгольцем была разработана теория резонансного действия названных волокон. Вам известно явление резонанса. Вы наблюдали, как резонируют камертоны, настроенные в унисон. Я позволю себе ограничиться лишь шутливым пояснением, приведенным одним физиком XIX в. во время его популярной лекции. Что такое резонанс? «Представьте себе собаку, откликающуюся на имя Филакс. Собака лежит под столом. Вы говорите о Геркулесе и Платоне, называете имена всех героев, которые вам приходят в голову. Собака не трогается с места, хотя очень легкое движение ее уха указывает, что она следит за вашей речью. Но стоит вам назвать имя Филакс, как она бросится к вам с радостным лаем. Камертон похож на собаку, он отзывается на имя А».

Как бы ни казалась простой и убедительной теория единичных резонаторов Гельмгольца, новейшие исследования заставили внести в нее существенные поправки. Колеблются не отдельные нервные струны, а отдельные участки мембраны. Однако основная идея Гельмгольца резонансного действия органов внутреннего уха осталась непоколебимой.

Звуковая гамма старше оптического спектра. Если знакомство с гармоническими звуками уходит в дали тысячелетий, то изучение спектра принадлежит истории и связано с именем Ньютона. Не Ньютон первый обнаружил образование спектра при прохождении света через призму. Цветные, радужные зайчики на стене от граненых стеклянных предметов люди видели задолго до Ньютона. Ньютону наука обязана обстоятельным изучением и объяснением этого явления. Белый солнечный луч состоит (по Ньютону) из цветных лучей, которые неодинаково сильно преломляются и поэтому становятся порознь видны на экране. Напомним опыт Ньютона. В ставне затемненной комнаты он прорезал круглое отверстие диаметром $^1/_4$ дюйма. Позади отверстия поместил стеклянную призму, а на расстоянии 22 футов от ставня поставил экран для получения солнечного изображения. При этом на экране появился цветной спектр в $2\frac{5}{8}$ дюйма ширины и $13\frac{1}{4}$ дюйма длины с загругленными концами. Ньютон решил, что спектр составляется из ряда кругов различных цветов, частично входящих один в другой и поэтому

смешанных. «Если бы можно было уменьшать диаметры этих кругов, сохраняя неизменными расстояния их центров, то они смешивались бы меньше»,— записал Ньютон. Однако уменьшение отверстия или замена его узкой щелью не привели бы к образованию перерывов при переходе от одного цвета к другому. Это противоречило предположению, что белый свет состоит из небольшого количества цветных лучей.

Продолжив мысленно спектр за фиолетовый край еще на такую же длину и приняв двойную длину спектра за единицу, Ньютон нашел, что расстояние от воображаемого конца спектра до конца фиолетовых лучей равно $^1/_2$, до конца синих — $^9/_{16}$, до конца голубых — $^3/_5$ и далее $^2/_3$, $^3/_4$, $^5/_6$, $^8/_9$ и 1 (до конца красных). Ньютону бросилось в глаза, что эти числа пропорциональны длинам струн, издающих последовательные тона минорной гаммы. Одного цвета, впрочем, не хватало. В английском языке синий и голубой обозначаются одним словом blue, и Ньютону для полной аналогии гаммы и спектра пришлось ввести в спектр еще один цвет — индиго (в нашем языке этот участок спектра обозначается словом «синий»).

Поскольку выделение основных цветов было произведено Ньютоном произвольно, то вся аналогия между гаммой и спектром оказывается искусственной. И все же аналогия эта полезна. «Что в звуке тон — то в свете цвет». Современник Ломоносова Леонард Эйлер в таких словах выразил эту же мысль: «Ничто,— говорил Эйлер,— так не способно разъяснить природу световых ощущений, как прекрасная аналогия между зрением и слухом. Какое значение имеют по отношению к уху различные тона музыки, такое для глаза имеют различные цвета. Цвета разнятся между собой подобным образом, как разнятся одни от других высокие и низкие тона. Но мы знаем, что высота в области звука зависит от числа колебаний, действующих на ухо в продолжение определенного времени, и что природа каждого звука определяется числом колебаний в секунду. Отсюда можно заключить, что каждый цвет соответствует также определенному числу колебаний, действующих на глаз».

Сколько цветов в спектре? Наверное, нельзя указать какое-либо определенное число различных цветовых оттенков. Можно лишь говорить об основных цветах. По Ньютону, их семь.

Известно шуточное мнемоническое правило для запоминания их последовательности по начальным буквам слов в фразе: «Каждый охотник желает знать, где сидят фазаны» — или в рифмованной форме:

Как однажды Жак звонарь
Голубой стащил фонарь.

Распределяя области отдельных цветов соответственно длинам волн, получим таблицу:

Цвет	Длина волны, мкм	Цвет	Длина волны, мкм
Красный	0,75—0,62	Голубой	0,53—0,50
Оранжевый	0,62—0,59	Синий	0,50—0,45
Желтый	0,59—0,57	Фиолетовый	0,45—0,40
Зеленый	0,57—0,53		

Человеческий глаз воспринимает, следовательно, световые колебания в пределах одной только октавы (0,40—0,75 мкм). Диапазон звуковых колебаний, воспринимаемых нашим ухом, значительно шире и охватывает десять октав, от 16 до 20 000 колебаний в секунду, или в длинах волн — от 21 м до 17 мм в воздухе при 15 °С. Между отдельными цветами нет резких границ. Цвета постепенно переходят один в другой, образуя различные оттенки, число которых у некоторых наблюдателей доходит до нескольких сотен. И все же спектр беден цветами по сравнению с бесконечным разнообразием красок в природе. Вы напрасно стали бы искать в спектре коричневую, сиреневую, пурпурную и многие другие краски.

Как происходит восприятие цветов глазом? О том, насколько сложен и неясен еще этот вопрос, можно судить по тому, что до настоящего времени высказано несколько десятков теорий цветного зрения.

Если для ответа обратиться к анатомии глаза, то первое, что является бесспорно установленным, это наличие двух видов светочувствительных элементов в сетчатой оболочке нашего глаза: палочек и колбочек. Так называют окончания нервных волокон зрительного нерва за их форму. Число их громадно: около 7 млн. колбочек и более 100 млн. палочек. Палочки более чувствительны к свету, но они не различают цветов, это дело колбочек. С наступлением вечера менее светочувствительные колбочки выходят из игры и начинается сумеречное, или палочковое, зрение. Мир представляется нам тогда бесцветным, по поговорке «ночью все кошки серы». Имея достаточно терпения, вы можете проверить это на опыте. С наступлением сумерек, когда в комнате становится все темней, держите перед глазами цветную картинку. Постепенно пестрые краски на вашей картинке будут темнеть, но все же еще можно различить цвета — красный, желтый... и вдруг происходит нечто поразительное: очертания предметов, изображенных на картинке, еще можно ясно различить, но краски исчезли, перед вами картинка в черных и белых тонах,

как на фотографии. Что случилось, ведь только что вы видели пестрые краски картинки? Вышли из строя колбочки, нечувствительные к слабому освещению. Включите свет электрической лампы, и яркие краски вспыхнут перед вами снова.

Вот мы и подошли вплотную к труднейшему вопросу, вокруг которого вели и сейчас еще ведут ожесточенные споры философы. Существуют ли цвета и тона независимо от глаза и уха или существуют лишь волны света и звука различной частоты, вызывающие впечатления цветности и тональности? Реален или иллюзорен мир красок и звуков? Вся сложность вопроса упирается в трудность преодоления свойства нашего сознания противопоставлять себя, наш внутренний мир внешнему, окружающему нас, реальному миру. Все станет на свое место, если мы поймем и запомним, что мы сами и наше сознание являемся частью материального мира. В этом реальном мире происходят взаимодействия различных видов материи. Думать, что свойства тел, проявляющиеся во взаимодействии между ними, реальны (действительны), объективны, а свойства, выявляющиеся во взаимодействии тех же тел с нашими органами чувств, являются лишь кажущимися, субъективными,— это значит становиться на позиции идеализма.

В форме цвета свойства вещей выступают во взаимодействии с организмом, обладающим соответствующими приборами («анализаторами», как их назвал И. П. Павлов), но в этом взаимодействии выступают свойства самих вещей.

Мир звуков и красок реален! Но не следует думать, что этот мир вызывает у всех совершенно одинаковые ощущения. Спрашивать, воспринимают ли другие люди цвета и звуки совершенно так же, как вы,— это ненаучная постановка вопроса. Всякое ощущение всегда есть ощущение определенного человека, зависящее от особенностей его организма. Английский физик Дальтон различал только три цвета и красные вишни отличал от зеленых листьев только по форме. А как же воспринимают мир люди, лишенные зрения или слуха? Как же воспринимают они объективные свойства вещей при отсутствии у них соответствующих анализаторов? По-своему, конечно! Вот что говорит, например, В. Короленко в известном рассказе «Слепой музыкант»: «Слепота застилает видимый мир темной завесой, которая, конечно, ложится на мозг, затрудняя и угнетая его работу, но все же из наследственных представлений и из впечатлений, получаемых другими путями, мозг творит свой собственный мир, грустный, печальный и сумрачный, но не лишенный своеобразия смутной поэзии».

Мир звуков и красок! Сколько поэтических переживаний, сколько философских раздумий связано с этими словами. При-

рода цвета! Недаром эта тема так взволновала и потрясла душу Гете. Возможно, что многие наши читатели знают о Гете только как о великом немецком поэте, творце художественной философской поэмы «Фауст». Но Гете был и естествоиспытателем. Восторженный почитатель природы, гениальный поэт не мог удовлетвориться только отвлеченным математическим объяснением природы, оторванным от мира чувств. Через 100 лет после Ньютона он выступил со своей теорией цветов как ярый противник учения о сложном составе света. «Возможно ли,— восклицает Гете,— чтобы свет, кажущийся нам наиболее чистым и однородным, именно белый свет в каждом отдельном тончайшем луче слагался по меньшей мере из семи лучей, различных по величине световых частиц, соответствующих отдельным цветам? Нет! Белый и черный представляют две основные противоположности, два полюса, как свет и тьма, они содержатся в известном соединении в каждом цвете и обусловливают своим соединением все цвета». В то время как Ньютон относил образование цветов только к свету, Гете считал, что наш орган зрения принимает значительное участие в их создании.

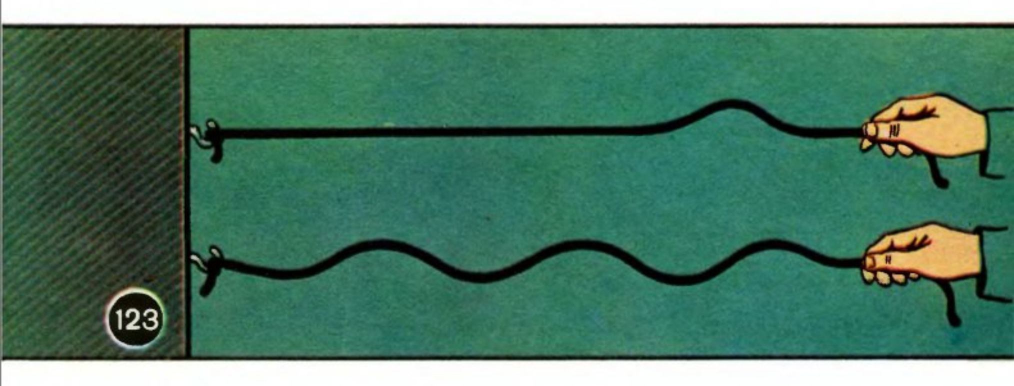
В страстной полемике с теорией Ньютона Гете не останавливается перед самыми запальчивыми и бездоказательными обвинениями и резкими выражениями в адрес этой теории. «Мы застаем это восьмое чудо света,— восклицает он,— оставленной руиной, которая грозит обрушиться, и начинаем сносить шпили и крыши, чтобы Солнце, наконец, заглянуло в это старое гнездо сов и мышей и осветило пораженному страннику бессвязный лабиринт, тесноту, случайное нагромождение, намеренную искусственность и жалкую штопку». Приводя эту цитату из гетевского «Учения о цветах», академик С. И. Вавилов в биографии Ньютона добавляет: «Этот наскок великого поэта кончился, однако, полным поражением Гете. Старый замок оптики Ньютона грозен и сегодня со всеми его архаизмами (устарелостями), ибо построен он на самом прочном фундаменте — на рациональном опыте».

Надо признать, однако, что во взглядах Гете, высказанных им в «Учении о цветах», есть рациональное зерно. Гете нападал на Ньютона, считая, что тот исследовал не «истинный» свет, а свет, «замученный» линзами, зеркалами, щелями. «Природа немеет на пытке»,— говорил Гете. С позиций современной физики, эта фраза заслуживает внимания. Опыты с микрообъектами убедительно показывают, что характер постановки эксперимента и экспериментальные средства могут существенно влиять на результаты измерений.

ДЕВЯТЫЙ ВАЛ

Больше всего я люблю море. Иногда оно совершенно спокойное, поверхность его ровная, гладкая, как стекло. Много раз я стоял на берегу и бросал камешки в воду. Интересно наблюдать, как разбегаются круговые волны. В школьном физическом кабинете мы много трудились над изготовлением водяной ванны для демонстрации волн. Стенки ванны должны быть пологими, иначе отражение волн от стенок испортит наблюдаемую картину. А затем придумали и смастерили приспособление для образования одновременно появляющихся, когерентных волн. Только тогда мы смогли наблюдать интерференцию волн.

В ветреную погоду ветер нарушает равновесие морской поверхности, и тогда можно видеть плоские, фронтальные волны. Кажется, будто море надвигается на берег, но это неверно. Частицы воды только колеблются около некоторых центров, поступательного движения частиц нет, но распространяется движение, передается энергия. Не перемещаются по полю колосья, «когда волнуется желтеющая нива», они только наклоняются и снова выпрямляются. Мы учили, что волны бывают поперечные и продольные. Когда частицы колеблются поперек направления распространения волны, такая волна называется поперечной. Вспоминаю опыт с резиновой трубкой. Один конец трубки был закреплен на стене. Другой конец учитель держал в руке, стоя у противоположной стены. Когда он встряхивал конец трубки, импульс распространялся, бежал от руки до стены. Если встряхивать трубку беспрерывно, то по трубке побежит цуг волн (рис. 123).

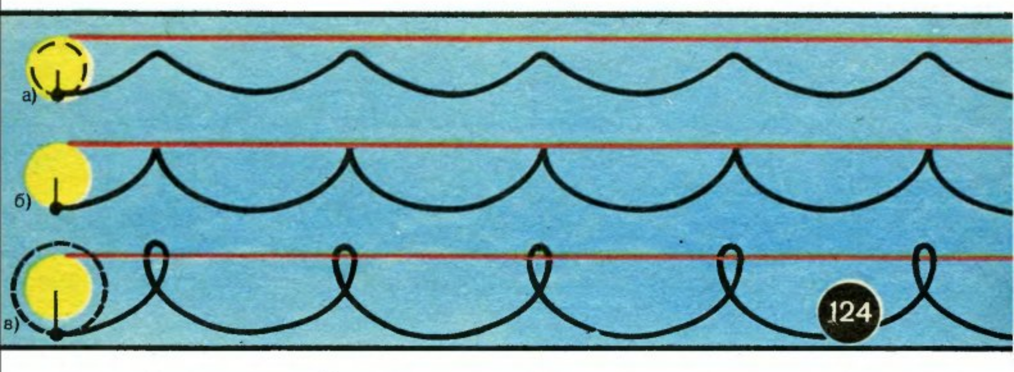


Поперечные волны характерны прежде всего для твердых тел, так как при поперечной волне изменяется форма тела, происходит деформация сдвига. Наблюдаются поперечные волны и на поверхности жидкости.

Другой вид волн — продольные. В продольной волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны, образуя ряд сгущенных и разреженных слоев. Так, например, распространяется звук в воздухе.

В жидкостях и газах частицы очень подвижны, и упругой деформации сдвига в них быть не может. Продольные волны связаны с изменением объема и плотности, вызываются сжатием и растяжением. Поэтому в жидкостях и газах возможны только продольные волны. В твердых телах продольные волны также возможны; например, при ударе молотком по зубилу энергия передается вдоль оси зубила.

А как быть с морскими волнами? Они ведь тоже поперечные: брошенная на поверхность волны пробка поднимается и опускается вниз, а волна идет к берегу. Значит, и на воде могут быть поперечные волны? Поперечными эти волны можно назвать лишь



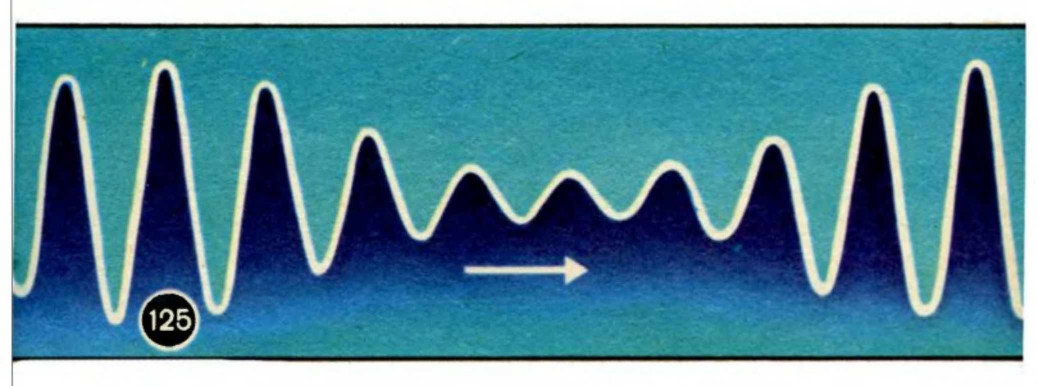
приблизительно. Колебания частиц не прямолинейные, а круговые. При больших амплитудах частицы движутся по более сложным траекториям. Поэтому большие волны выбрасывают на берег плавающие предметы.

Волны на поверхности воды представляют собой сочетание двух движений: кругового движения частиц воды и переноса профиля волны вдоль распространения волны. Если волна движется слева направо, то водяные частицы движутся против часовой стрелки.

Вырежем из картона круг радиусом R и проколем отверстие на расстоянии r от центра. В это отверстие должен проходить кончик остро очиненного карандаша. Будем теперь катить кружок без скольжения вдоль приложенной сверху линейки и делать карандашом отметки через прокол. Тогда на подложенном под прибор листе бумаги получатся точки кривой линии, которая в математике называется трохоидой (рис. 124, *а*). Если $r=R$, то получится циклоида (рис. 124, *б*), а если сделать ступенчатый

шкив из двух шкивов разного диаметра и малый шкив катить по линейке, то кривая, описанная точкой, находящейся от центра дальше R (радиус качения), получится петлеобразной (рис. 124, *в*). Вообще говоря, высота волны бывает меньше R, и водяные волны приближаются к трохоиде. Только при сильном ветре или на неглубокой воде высота волны может стать больше радиуса качения, и тогда образуются пенистые гребни. Это мы и наблюдали на море. Волны вдали от берега шли гладкие, а приближаясь к берегу, образовывали гребешки. На Рижском взморье это особенно хорошо заметно (при слабом ветре), так как у берегов море очень мелкое. При сильном ветре барашки видны и далеко в море.

Почему самым страшным считается девятый вал? Я пробовал считать, какая волна по порядку имеет наибольшую высоту, но счет не сходился. То это была седьмая, то десятая волна. Помню,



в музее я долго стоял перед картиной Айвазовского «Девятый вал». Становилось страшно. Вся верхняя часть картины наполнена фиолетово-розовой мглой, пронизанной золотом низко стоящего солнца, и клубящимися, расплывающимися, похожими на горящий туман облаками. Под ними хрустальное, зеленовато-синее море, высокие бурные гребни которого переливают всеми цветами радуги. На корабельной мачте среди волн, единственном уцелевшем обломке затонувшего корабля, кучка гибнущих людей... Что же это такое, девятый вал? Миф? Или есть физическое объяснение этому грозному явлению?

Оказывается, число девять действительно заимствовано из древнегреческой мифологии. Образование «девятого вала» — это результат сложения крупных волн, по длине лишь немного отличающихся одна от другой. Это, как мы знаем из физики, приводит к биениям (рис. 125). Вовсе не обязательно, чтобы наибольшей высоты получалась девятая волна после восьми промежуточных, это может быть и восьмая, и десятая волна, и т. д.

Подробнее об этом можно прочитать в книгах В. В. Шулейкина «Физика моря» и «Дни прожитые». Поэт, композитор, влюбленный в море физик описывает в книге «Дни прожитые» свою жизнь, свой путь становления ученого, описывает свои дальние плавания в Арктику на экспедиционном судне «Персей», экзотику южных морей, встречи со знаменитыми учеными Жуковским, Лазаревым, индийским физиком Раманом и многими другими.

КОНСУЛЬТАЦИЯ ПО ТЕМЕ «ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА»

Николай Николаевич, учитель физики, по окончании урока убрал приборы и только собирался запереть физический кабинет, как вдруг заметил одинокую фигуру ученика.

— Ты меня ждешь, Миша?

— Да, Николай Николаевич, мне очень хотелось бы задать вам несколько вопросов по последней теме. Можно?

— Конечно. Только почему ты не задал вопросы в классе, быть может, и товарищам твоим было бы полезно их услышать?

— Мне казалось, что эти вопросы простые и ребята будут смеяться.

— Ну хорошо. Заходи в кабинет, садись к столу. Какие у тебя вопросы?

— Вопросы по интерференции и дифракции света. Первые три вопроса по интерференции. Во-первых, что значит само слово «интерференция», как его перевести на русский язык и кто придумал этот термин? Второй вопрос о когерентности. В книге ответ на этот вопрос есть, но мне хотелось бы подробней узнать, почему для водяных и звуковых волн можно получить интерференцию от двух самостоятельных источников колебаний, а для света интерференцию от двух ламп никогда не получишь. Третье: не противоречит ли интерференция закону сохранения энергии? Затем...

— Давай по порядку. Если надо будет, то потом задашь другие вопросы. Итак, первое — происхождение и значение термина «интерференция». Слово «интерференция» было введено в оптику в 1801 г. английским ученым Юнгом, причем это слово появилось сначала в причастной форме — интерферирующий, а через два года и в форме существительного — интерференция. Слово это английское (interference) и означает «вмешательство», «столкновение», «встречу». Юнг употребил его в смысле «встреча лучей», «перекрещивание лучей». Но еще до Юнга в XVII в. профессор математики Гримальди наблюдал и описал это явле-

ние, хотя и не дал ему ни объяснения, ни названия. Термин же «дифракция», о котором ты, наверно, тоже будешь задавать вопрос, принадлежит именно Гримальди.

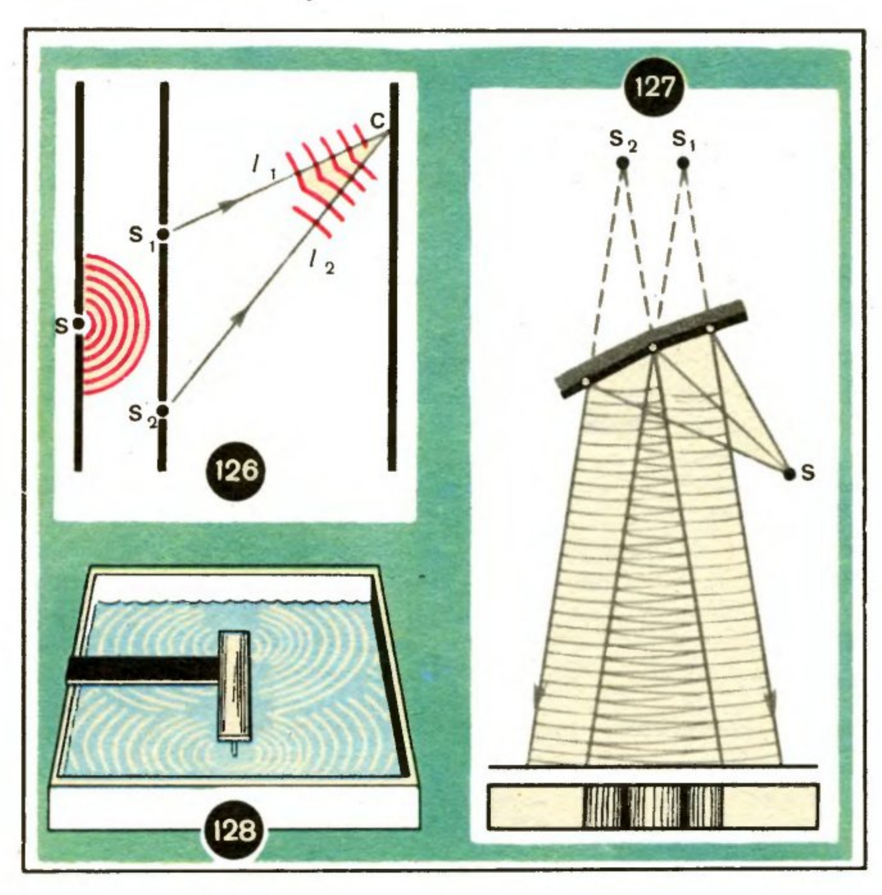
Юнг так формулировал открытый им закон: «Везде, где две части одного и того же света попадают в глаз различными путями, либо точно, либо весьма близко по направлению, свет становится более сильным там, где разность путей есть целое кратное некоторой длины, и наименее сильным в промежуточных состояниях интерферирующих частей; эта длина различна для света различных цветов».

Две системы волн, порожденных одним и тем же источником света, Юнг получал при помощи двух узких щелей S_1 и S_2 (рис. 126). Усиление и ослабление в произвольной точке C экрана зависело от разности хода лучей $l_2 - l_1$.

Другой способ получения интерферирующих волн был применен французским инженером и ученым Френелем, современником Юнга. Этот опыт хорошо описан в учебнике, и я ограничусь лишь рисунком, из которого видно, что разность хода двух волн достигалась в этом случае отражением света от двух зеркал, поставленных друг к другу под углом, близким к 180° (рис. 127). Послушай, я прочту тебе одно место из сочинения Френеля, оно поможет лучше понять и твой второй вопрос: «Всякому случалось, бросая камень в спокойную воду, замечать, что когда две группы волн пересекаются на ее поверхности, то бывают точки, где она остается неподвижной, тогда как бывают другие, где волны вздымаются через их соединение. Причину легко усмотреть. Волнообразное движение водяной поверхности состоит из вертикальных движений попеременно поднимающихся и опускающихся частиц жидкости. Но вследствие перекрещивания волн случается, что в некоторых точках встречи одна из волн приносит восходящее движение, тогда как другая стремится в то же время понизить поверхность жидкости. Если два импульса одинаковы, жидкость не может уже подчиниться одному преимущественно перед другим и должна оставаться в покое. Напротив того, в тех точках встречи, где движения слагаются в одну сторону, где они постоянно согласны, жидкость, гонимая в одну сторону двумя волнами, поднимается или опускается со скоростью, равной сумме двух полученных импульсов...» Конечно, и тебе приходилось, бросая камни в воду, наблюдать, как от места падения бегут, расходясь кругами, волны. Если бросить в воду два камня, то можно наблюдать, как переплетаются две системы волн. Наблюдаемая картина слишком, однако, кратковременна. Для получения устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы источники посылали волны непрерывно и согласованно, т. е. чтобы волны одинаковой длины выходили с

постоянной разностью фаз. Эта согласованность источников и называется когерентностью.

Для механических и звуковых волн это условие может быть выполнено разными способами. Ты помнишь, что на уроке мы достигали этого, вызывая в водяной ванне волны при помощи двух согласованных вибраторов — двух штифтов, прикрепленных к одной пружине (рис. 128). Для одновременного наблюдения мы проецировали явление на потолок. Светлые места в проекции соответствовали участкам неподвижной поверхности воды, через которые свет проходил беспрепятственно, а темные — местам наиболее оживленного движения частиц воды. Располагались эти места на ветвях гипербол. Интерференцию звуковых волн можно наблюдать при помощи двух настроенных в унисон камертонов, которые укреплены на концах одной линейки. В зависимости от разности хода двух звуковых волн, посылаемых камертонами, в некоторой точке будет происходить усиление или погашение звука.



Совершенно иначе обстоит дело со светом. Из повседневного опыта мы знаем, что, освещая стену комнаты второй лампой, мы никогда не получим ослабления освещения от первой лампы, а всегда усилим его. Но почему? Раскаленная нить лампы состоит из многих миллионов атомов. Излучение света разными атомами происходит беспорядочно, так как вызывается случайными, взаимно не согласованными перескоками электронов с «возбужденных» уровней. Продолжительность жизни электрона на «возбужденном» уровне составляет обычно около 10^{-8} с. Соответственно этим беспорядочным изменениям в излучении происходят и миллионы раз в секунду изменения интерференционной картины. Налагаясь друг на друга, такие изменения усредняются, компенсируются, и глаз получает ощущение равномерной освещенности поверхности. Поэтому для наблюдения интерференции света остается лишь один путь — заставить световую волну интерферировать саму с собой, что и удается сделать в установке Юнга или Френеля, когда свет от одного источника направляется к экрану двумя путями, от двух щелей или двух зеркал. В этом случае все возмущения, которые испытывают обе системы волн, происходят согласованно, так как являются возмущениями в одной и той же волне, от одного и того же источника.

Теперь третий вопрос. Повтори его, пожалуйста.

— В книге написано: «Совместное действие двух световых пучков может привести к возникновению темноты или, выражаясь фигурально, свет плюс свет могут дать темноту». У меня и возник вопрос: куда же денется энергия того и другого пучка? Ведь не может же она уничтожиться?

— Конечно, нет! Фраза учебника относится не ко всем посылаемым источником пучкам, а лишь к интерференции на одном каком-либо луче (на одном каком-нибудь направлении). Вся парадоксальность таких фраз, как «Свет + свет = темнота» или «Звук + звук = тишина», только кажущаяся. Недоразумение разрешится, если мы рассмотрим не один разрез интерференционной картины, где две волны одинаковой частоты, но в противоположных фазах взаимно уничтожают друг друга, а все интерференционное поле в целом. В некоторых местах поля мы будем наблюдать темноту, в других (где происходит сложение амплитуд) — свет. Энергия не уничтожилась, она только перераспределилась. Возникли места, где интенсивность освещения больше суммы освещенности слагаемых, в других — меньше или даже равна нулю. Энергия волны пропорциональна квадрату амплитуды, но известно, что квадрат суммы двух положительных чисел не равен, а больше суммы квадратов этих чисел:

$$(a+b)^2=a^2+b^2+2ab.$$

Это упрощенное объяснение для случая, когда волны совпадают по фазе, но, думаю, оно делает вопрос понятным. Когда же амплитуды имеют разные знаки, то

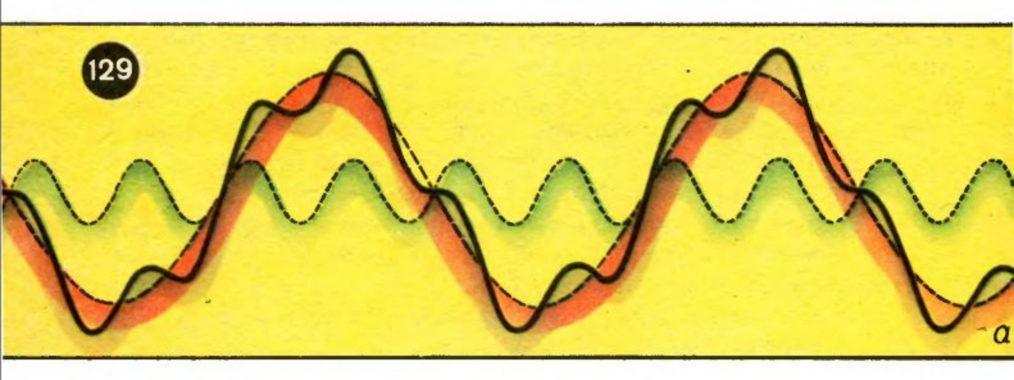
$$(a-b)^2=a^2+b^2-2ab$$

или при равенстве $a=b$ в сумме имеем нуль.

В том случае, когда накладываются друг на друга некогерентные волны, интенсивности просто складываются, и освещенность двумя источниками равна сумме освещенностей от каждого из них в отдельности. Ты понял это?

— Да. Но что будет происходить, если будут встречаться волны неодинаковой длины? Будет ли при этом интерференция?

— В толковании термина Юнгом интерференция есть встреча лучей, но обычно этим названием обозначают рассмотренные

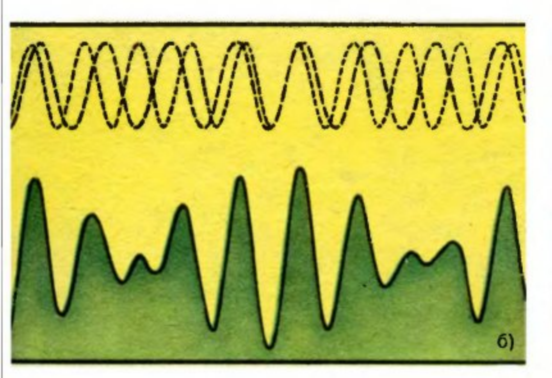


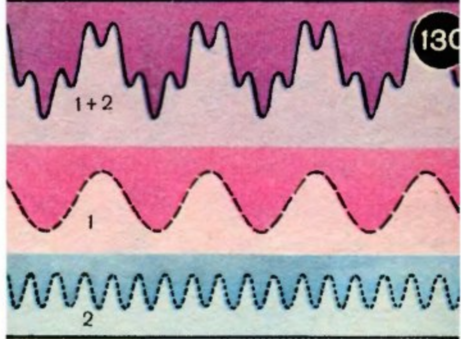
только что случаи встречи волн одинаковой длины. Однако полезно вспомнить, что мы знаем о сложении волн разной длины. Мы останавливались на двух крайних случаях: сложении волн, резко отличающихся по длине, и сложении волн, мало разнящихся по длине. В первом случае результирующая волна сохраняет характер волны большой длины, но поверхность ее не гладкая, а изрытая наложенными мелкими «волночками». В акустике этот случай помогает нам понять происхождение тембра, или оттенка, звука. Звук одинаковой силы и высоты, но произведенный различными источниками (рояль, гитара, человеческий голос), имеет разный оттенок вследствие примеси к основному тону добавочных тонов (рис. 129, *а*).

Если складываются волны, мало отличающиеся по длине, то они периодически то усиливают, то ослабляют друг друга, и результирующая волна имеет переменную амплитуду. Это биения (рис. 129, *б*). Оба эти примера представляют собой лишь частные случаи интерференции волн с различной частотой. В более слож-

ных случаях возможно сложение нескольких волн с различным набором частот. В результате получается периодическая кривая, но более сложной формы. Французский математик и физик Фурье доказал, что, и обратно, всякое периодическое колебание может быть разложено на ряд гармонических колебаний (рис. 130).

При помощи интерференции можно измерить длину световой волны любого цвета. Длина же световой волны положена сейчас в основу определения единицы длины. Метр сейчас определяется уже не по архивному эталону, хранящемуся в Севре под Парижем. 14 октября 1960 г. XI Международная конференция по мерам и весам приняла резолюцию о новом определении метра как длины, равной 1 650 763,73 длин волн излучения в вакууме, соответствующего оранжевой линии спектра изотопа криптона с атомной массой 86. Одновременно принято решение об отмене

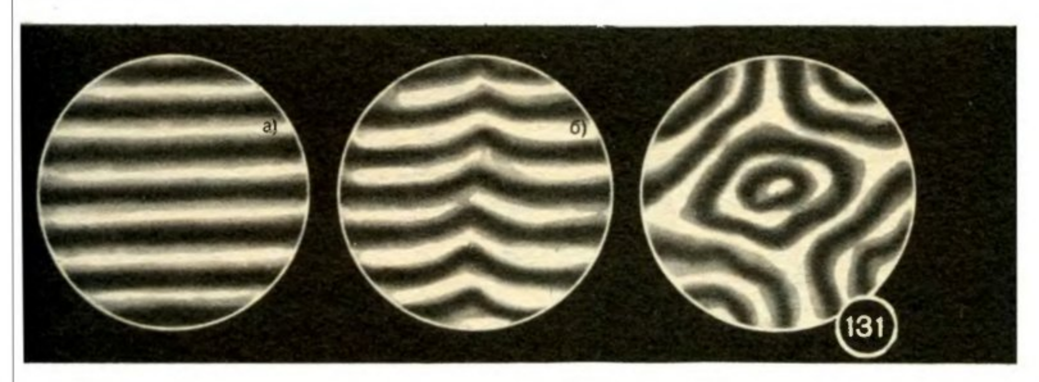




прежнего определения метра. Новое определение метра придает эталону единицы длины характер естественной и неуничтожимой меры и повышает его точность примерно в 100 раз.

Кроме того, в технике интерференция используется в контрольно-измерительных приборах. Это позволяет, например, вести обработку поверхностей некоторых деталей с очень большой точностью. Для этой цели служат приборы, называемые интерферометрами. Действие их основано на получении интерференции света в тонких пластинках: луч света испытывает отражение как от контрольной, идеально гладкой поверхности, так и от поверхности исследуемой детали. При этом отраженные лучи проходят различный путь и попадают в глаз с некоторой разностью хода. Разность хода зависит от длины световой волны, от угла падения лучей и от расстояния между контрольной и испытуемой поверхностью. Если бы испытуемая поверхность тоже была идеально гладкая, то при освещении однородным светом (желтым, например) в интерферометре были бы видны светлые и темные по-

лосы на равных расстояниях (рис. 131, *а*). Наличие на испытуемой поверхности впадин, бугров и каких-либо дефектов вызывает изменение разности хода лучей, и тогда интерференционная картина меняется (рис. 131, *б*, *в*). Интерференционный метод позволяет определить чистоту обработки поверхности с точностью до 0,1 длины волны, т. е. около 0,05 мкм. Интерферометры применяются и для анализа газов — определения концентрации примесей, для определения ничтожных изменений давления и температуры. В медицине они позволяют производить анализ крови... Но мы уклонимся от цели нашей беседы, если будем перечислять разнообразные практические применения интерференции; их слишком много. Впрочем, вот еще одно интересное применение: если ты занимаешься фотографией, то я посоветовал бы тебе поинтересоваться объяснением «просветленной» оптики в объективах фотоаппаратов.



Теперь перейдем к дифракции. Какие сомнения в этом вопросе?

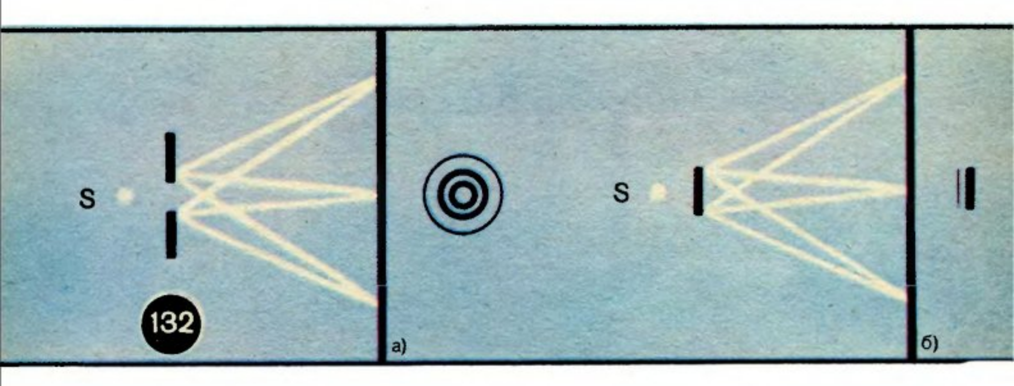
— Хотелось бы поточнее узнать об условиях получения резких теней, а также резких изображений при прохождении света через малые отверстия. Ведь, насколько я понял, дифракция наблюдается в двух случаях: при огибании препятствий на пути света и при прохождении света через отверстия.

— Оба случая сводятся к одному. Отклонение света от прямолинейного распространения, предписываемое ему волновой оптикой, происходит на краях непрозрачных предметов, будут ли это экраны (заслон) или края диафрагмы (перегородки с отверстием). Рисунки 132, *а, б* иллюстрируют оба эти случая. Дифракция происходит при отбрасывании тени от любого предмета, даже если он и не очень мал.

Иногда можно встретить неточное утверждение, будто дифракция наблюдается только тогда, когда размер предмета сравним с длиной волны. В действительности дифракция представ-

ляет собой явление довольно обычное, но для ее обнаружения в оптике требуются особые условия.

Чтобы уточнить вопрос, приведу один исторический факт. Теорию дифракции разработал Френель. Представленный им во Французскую Академию наук «Мемуар о дифракции света» встретил сильные возражения со стороны некоторых первоклассных математиков, в частности со стороны Пуассона, ярого противника волновой теории света. Пуассон показал, что из теории Френеля, если бы она была верна, следует, что свет должен был бы проникать в середину тени круглого предмета так же, как если бы никакого препятствия и не было. Это казалось таким невероятным и так подрывало выдвинутую теорию, что Араго, сразу ставший на сторону Френеля, решил проверить этот парадоксальный вывод на опыте. Опыт подтвердил следствие из теории Френеля — в середине круглой тени при некотором уда-



лении экрана от источника действительно оказалось светлое пятно.

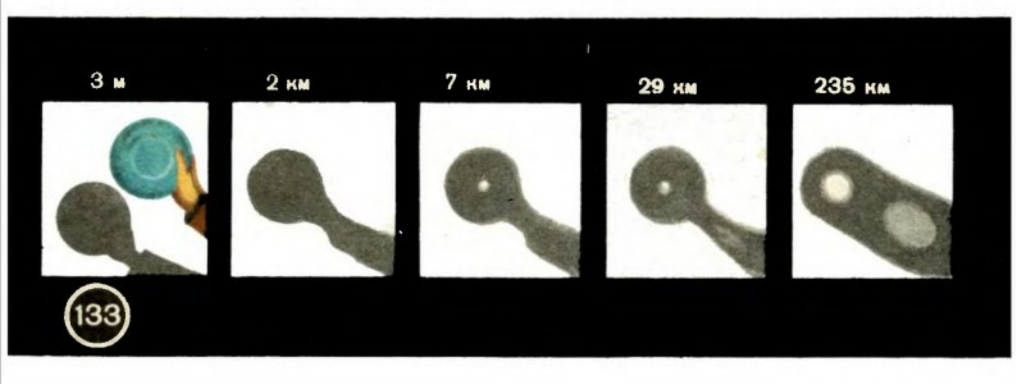
Вот фотографии, сделанные московским профессором Аркадьевым, на которых показана тень от тарелки на различных расстояних от источника и от экрана (рис. 133). Опыт был выполнен с уменьшенной моделью руки с тарелкой. Расстояния до экрана, поставленные над рисунками, пересчитаны для опыта с тарелкой натуральной величины.

Точно так же и картина дифракции от краев отверстия зависит не только от размера отверстия, но и от расстояний от источника света и от экрана. Если будете делать безобъективный фотоаппарат, камеру-обскуру, то размеры отверстия придется подбирать опытным путем, так как наиболее четкие изображения в камере получатся лишь при определенных размерах камеры и отверстия. Еще более любопытно то, что объектив фотоаппарата можно заменить стальным шариком. Немецкий физик Поль в книге «Введение в оптику» рассказывает, как это сделать.

Огромное значение имеет дифракция в теории и практике оптических приборов — микроскопов, телескопов. Она ставит предел «разрешающей силе» этих приборов.

Дифракция наблюдается и на частицах, беспорядочно расположенных в пространстве (дым, туман) и в правильных пространственных решетках кристаллов. Однако для наблюдения дифракции в кристаллах приходится применять рентгеновские лучи, длина волны которых значительно меньше, чем длины волн видимого света.

Одним словом, надо совершенно четко усвоить, что явления интерференции и дифракции относятся ко всем видам волн: на поверхности воды, звуковым, электромагнитным. Когда в каком-нибудь неизвестном явлении обнаруживается интерференционная или дифракционная картина, то это говорит о волновых свойствах явления. В 1924 г. французский физик де Бройль вы-



133

сказал предположение о необходимости приписать волновые свойства электронам. Три года спустя экспериментально была получена дифракция электронов. Таким образом, волновые свойства электронов были доказаны на опыте.

Интересно еще одно явление волновой оптики — поляризация света.

Все три явления: интерференция, дифракция и поляризация — изучались почти в одно и то же время, в первой четверти XIX в. Это было время острой борьбы двух теорий света: корпускулярной и волновой. На той и другой стороне стояли первоклассные ученые, но огромный авторитет Ньютона, творца корпускулярной теории, делал ее почти неприступной крепостью. Однако, как всегда, решает эксперимент. Явления интерференции и дифракции, легко объяснимые с точки зрения волновой теории, поколебали столетнюю традицию, в силу которой теория Ньютона считалась незыблемой. Но оставался нерешенным вопрос, к каким волнам, продольным или поперечным, следует от-

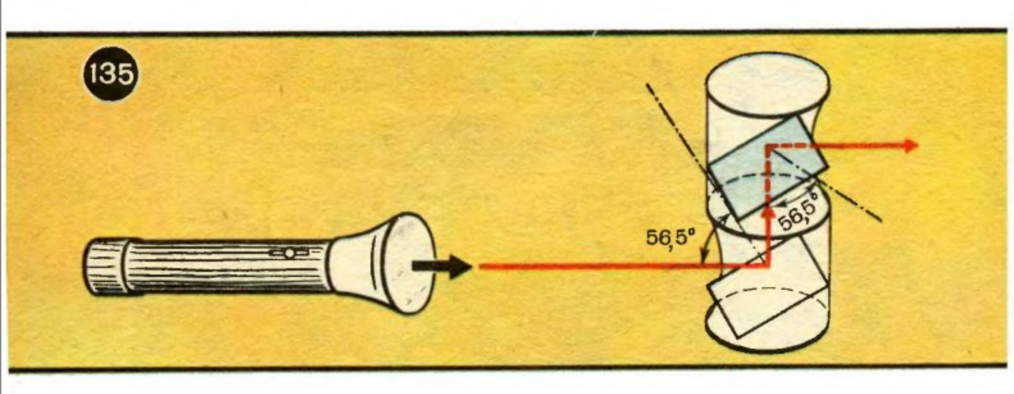
нести световые волны. В дело вмешался случай. Еще со времен Гюйгенса, современника Ньютона и творца волновой теории, было известно явление двойного преломления света в кристаллах исландского шпата. «Из Исландии, острова, находящегося в Северном море на широте 66°, привезли камень (исландский шпат), весьма замечательный по своей форме и другим качествам, но более всего по своим странным преломляющим свойствам»,— писал Гюйгенс. Рассматриваемая через кристалл исландского шпата надпись казалась двойной. Луч, входящий в кристалл, раздваивался. Один из этих лучей назвали обыкновенным, другой — необыкновенным (рис. 134). Поведение необыкновенного луча не подчинялось обычным законам преломления света, по которым луч, упавший на поверхность раздела двух сред перпендикулярно, входит в другую среду не преломляясь. Необыкновенный луч преломлялся и в этом случае. В январе 1808 г. Па-



рижская Академия наук объявила конкурс на лучшее объяснение двойного преломления света. Молодой военный инженер Малюс с большим интересом взялся за решение задачи. Однажды вечером он рассматривал через таинственный кристалл лучи заходящего солнца, отраженные от стекол в окнах Люксембургского дворца. Он заметил, что два изображения, наблюдаемые через кристалл, при вращении кристалла меняли свою яркость, по очереди делаясь ярче или темнее, а при некотором положении кристалла вместо двух изображений получалось одно. Когда наступила ночь, Малюс повторил опыт, но со светом свечи, отраженным от поверхности воды. Явление повторилось и в этом случае. Это наблюдение побудило Малюса заняться тщательным исследованием явления. В эпоху электрических и электрохимических открытий начала XIX в. идея полярности (противоположности) волновала умы ученых. Поэтому Малюс лучи, проявлявшие различные свойства, назвал поляризованными, а наблюдавшееся при прохождении света через кристалл или при

отражении и преломлении явление — поляризацией. Будучи сторонником теории Ньютона, Малюс объяснял поляризацию света тем, что светоносные корпускулы в различных случаях по-разному ориентируются в пространстве. Свои исследования Малюс проводил сначала с исландским шпатом, а потом с зеркалами.

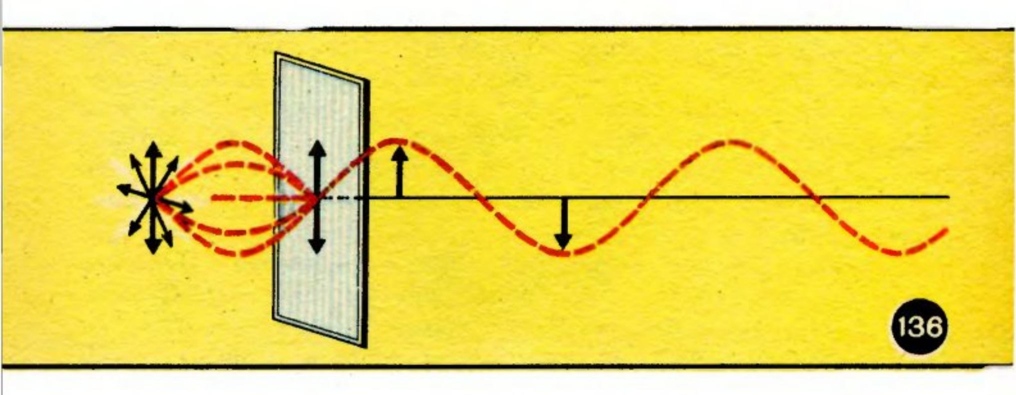
Прибор для наблюдения поляризации света можно изготовить самому (рис. 135). Для этого понадобятся две одинаковые стеклянные пластинки, картон, электрический фонарик и клей. Из картона надо изготовить две трубки такого размера, чтобы внутри при помощи воска можно было укрепить стекла (задние поверхности стеклянных пластинок лучше сделать черными, чтобы прошедший через них свет поглощался; можно взять черные негативы). Чтобы верхнюю часть прибора можно было поворачивать вокруг оси, надо будет сделать картонный поясок



(не показанный на рисунке). Пластинки надо укрепить внутри так, чтобы свет от фонарика падал по возможности под углом 56,5°. Линзу фонарика следует отрегулировать, чтобы свет выходил параллельным пучком. Параллельные лучи через боковое отверстие в трубке будут падать на нижнее стекло, отражаться и идти вдоль трубки вверх на второе стекло. Если обе пластинки параллельны друг другу, то интенсивность света, выходящего через верхнее боковое отверстие, будет наибольшая. Если же повернуть верхнюю часть прибора на 90°, то интенсивность будет наименьшая, а если угол падения будет точно 56,5°, то не будет наблюдаться отражения света от верхней пластинки.

Как же это объяснить? Свет есть колебательный процесс (периодически изменяется электромагнитное поле). Атомы источника света посылают электромагнитные волны. В каждое мгновение «загораются» и «угасают» миллиарды атомов, посылающих излучение во все стороны. Причем распространяющиеся от каждого атома колебания происходят в какой-то одной плос-

кости. Для разных атомов эти плоскости не совпадают. При отражении и преломлении света на поверхности диэлектрика всегда происходит частичная поляризация света. Поляризация света происходит также при прохождении света через некоторые кристаллы (исландский шпат, кварц, турмалин). Можно дать наглядное объяснение того, что тут происходит, при помощи механической модели. Проденем сквозь решетку веревку (в простейшем случае можно использовать щель приоткрытой двери) и будем сообщать веревке колебания в различных плоскостях. Только те колебания, которые происходят в плоскости щели, пройдут через нее. После прохождения через щель колебания будут поляризованы (рис. 136). Таким образом, явление поляризации показывает, что световые волны поперечны, т. е. колебания совершаются перпендикулярно к направлению распространения волны.


136

Возвращаясь к явлению двойного лучепреломления, заметим, что обыкновенный и необыкновенный лучи оказываются поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях. Изображенный на рисунке 134 необыкновенный луч поляризован в плоскости рисунка, а обыкновенный луч — перпендикулярно к плоскости рисунка. Под плоскостью поляризации луча мы понимаем здесь плоскость колебаний вектора электрической напряженности в световой волне.

В настоящее время промышленностью изготовляются материалы, обладающие способностью поляризовать свет. Их называют поляроидами; они находят разнообразное применение. Если бы удалось достать две поляроидные пластинки, то прибор можно было бы сделать и проще, и интересней, чем со стеклянными пластинками. Наблюдение тогда надо будет вести не в отраженном свете, а в проходящем. При одном положении поляроидов свет будет проходить через пластинки, при другом — будет задерживаться. Если «погасить» свет скрещиванием по-

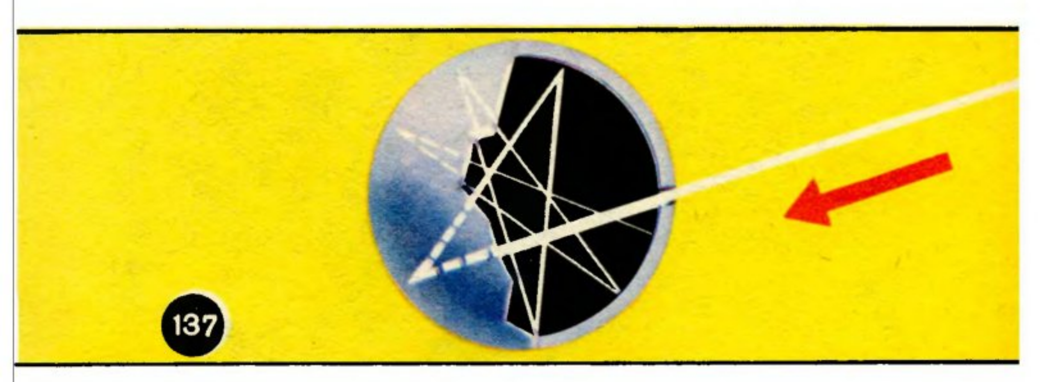
ляроидов, а затем поместить между ними какой-нибудь прозрачный предмет, например кристаллы, и тем нарушить однородность промежуточной между поляроидами среды, то на темном фоне вспыхнет картина сверкающих кристаллов. Этим явлением пользуются для изучения напряжения в различных частях строительных конструкций и деталей машин. Из плексигласа изготовляют модель соответствующей части и ставят ее в условия, в каких будет «работать» техническая деталь. Вызванные в этих условиях напряжения внутри материала создают в нем неоднородность, которая легко прослеживается в поляризованном свете.

АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ СОЛНЦЕ

Абсолютно черное Солнце?! Что это — мотив картины какого-нибудь художника-абстракциониста или глава фантастического романа? Ни то, ни другое. А излучение нашего Солнца действительно происходит по законам, близким к законам излучения абсолютно черного тела. Так называют в физике тело, которое поглощает все падающие на него лучи. Не следует смешивать это физическое понятие с тем, что обычно именуется черным. Среди окружающих нас тел мы не найдем ни одного, которое подходило бы под вышеприведенное определение. Наиболее близко приближаются к абсолютно черному телу: черная матовая бумага, поглощающая 95% падающего на нее света, сажа с поглощением 98%, черный бархат — 99,6%. Однако можно искусственно получить почти совершенно абсолютно черное тело, если сделать небольшое отверстие в стенке полости, выполненной из любого материала (рис. 137). Внутренние стенки полости не обязательно при этом зачернять. Попавший через отверстие внутрь этого полого тела луч как бы мечется в западне, испытывая при каждом отражении частичное поглощение энергии. Пусть поглощательная способность стенок полости 80%. Значит, отраженный луч будет иметь 20% энергии падающего луча. При втором отражении останется только 4%, при третьем — 0,8% и т. д. Небольшое окошечко в подвале кажется черным, даже если стены подвала окрашены в белый цвет. Зрачок (отверстие в радужной оболочке глаза) тоже всегда кажется черным.

Не путайте отражение света с излучением. Излучение, зависящее от температуры тела, называют температурным излучением. Исследование этого вида излучения позволило установить его законы, с ними мы сейчас и познакомимся. Одним из важнейших законов такого излучения является закон Стефана—Больц-

мана, устанавливающий зависимость излучения от температуры тела. Поскольку абсолютно черные тела все излучают одинаково, то исследование закономерностей излучения проводится с абсолютно черными телами. Согласно закону Стефана—Больцмана излучение черного тела прямо пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела. Излучательная способность тела находится в прямой пропорциональной зависимости от его поглощательной способности. Абсолютно черное тело, обладающее максимальной (полной) поглощательной способностью, должно обладать и максимальной по сравнению с нечерными телами излучательной способностью. Изучение поглощательной и излучательной способности представляет практически важную задачу и производится при помощи весьма чувствительных приборов — болометров и термоэлементов. На рисунке 138 показана простая схема для исследования распределения



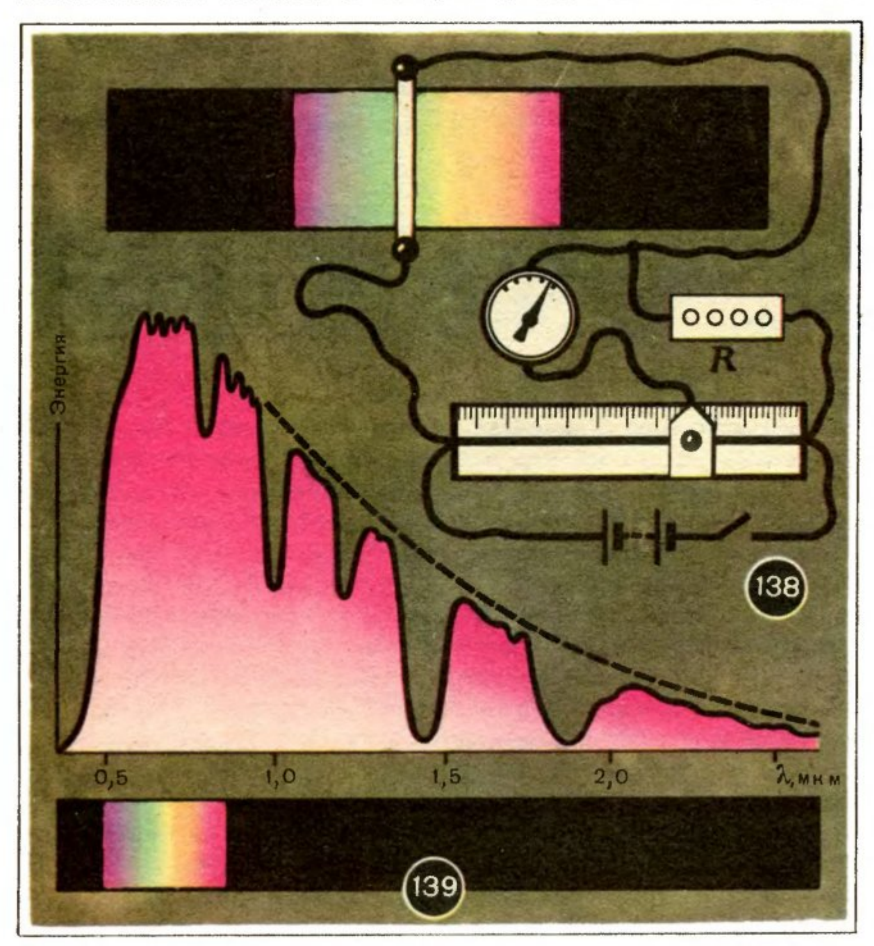
энергии в солнечном спектре. Изготовленный из тонкой проволочки или пластинки термочувствительный элемент помещается в исследуемую часть спектра, изменение его электрического сопротивления под действием поглощенной энергии измеряют с помощью мостика Уитстона. Отсюда может быть вычислена и степень нагревания с точностью до 10^{-7}°C. Результат исследования распределения энергии представлен на рисунке 139. Максимум энергии находится в желто-зеленой части спектра.

Положение максимума энергии излучателя зависит от его температуры. Исследования с абсолютно черными излучателями показали, что с повышением температуры максимум излучаемой энергии смещается все больше и больше в сторону коротких волн (рис. 140). Сопоставление кривых распределения энергии в спектре Солнца показало, что солнечный спектр почти совпадает со спектром абсолютно черного тела при температуре 6 000 °C. Отсюда можно сделать вывод, что и температура поверхности Солнца должна выражаться приблизительно тем же

числом. В бесконечном разнообразии звездных миров обнаружены солнца и значительно более горячие и менее горячие.

Подобно тому как железо при нагревании проходит последовательно стадии красного, желтого и белого каления, так и звезды в зависимости от их температуры отличаются по цвету. Так, ближайшая к нам звезда Проксима в созвездии Центавра темно-красного цвета с температурой поверхности всего лишь 3 000 °С, желтые звезды типа нашего Солнца имеют температуру около 6 000 °С, тогда как температура голубовато-белого Сириуса оценивается в 10 000 °С.

Применение законов волновой теории света к распределению энергии черного тела привело к выводу, не совпадающему с результатами наблюдений и находившемуся в резком противоречии даже с законом сохранения энергии. Остановимся на этом исключительно важном в истории физики моменте несколько



подробнее. Классическая волновая теория приводила к заключению, что энергия излучения должна возрастать непрерывно при передвижении по спектру от красной части к фиолетовой. Как видно при взгляде на кривые распределения энергии по длинам волн, это возрастание наблюдается только до некоторого значения, которое является для данной кривой максимумом. В солнечном спектре, как уже сказано, максимум находится в его желто-зеленой части. В фиолетовой и особенно ультрафиолетовой частях спектра энергия не возрастает, а резко падает. Создалось, таким образом, совершенно нетерпимое противоречие между теорией и опытом. Этот кризис в теории получил у физиков название «ультрафиолетовой катастрофы». Действительно, если бы не было максимума в кривой излучения, то всякое нагретое тело, например почва, должно было бы излучать в первую очередь не тепловые лучи, а рентгеновские и еще более коротковолновые и «жесткие» лучи. К счастью, это не так. Максимум энергии излучения тел, с которыми мы сталкиваемся в обыденной жизни, лежит далеко в области инфракрасных лучей. Сидя около истопленной печки, мы ощущаем лишь приятное тепло.

Обратите внимание на кривые распределения энергии черного тела. Один взгляд на эти кривые вызовет у нас воспоминание о законе распределения скоростей молекул идеального газа, разработанном Максвеллом (см. часть I, беседа «В мире молекул»). Уже эта аналогия подсказывает идею о том, что и энергия нагретого тела, возможно, сосредоточена как бы в некоторых центрах и излучается отдельными неделимыми порциями. Такие порции получили название квантов. Разным длинам волн отвечают различные кванты. Зависимость энергии кванта от длины волны излучения (или от его частоты) выразил Макс Планк (1900):

$$\varepsilon = h\nu.$$

Здесь ε — энергия кванта, ν — частота излучения, h — универсальная постоянная, получившая название постоянной Планка. Это одна из «великих постоянных природы», постарайтесь ее запомнить:

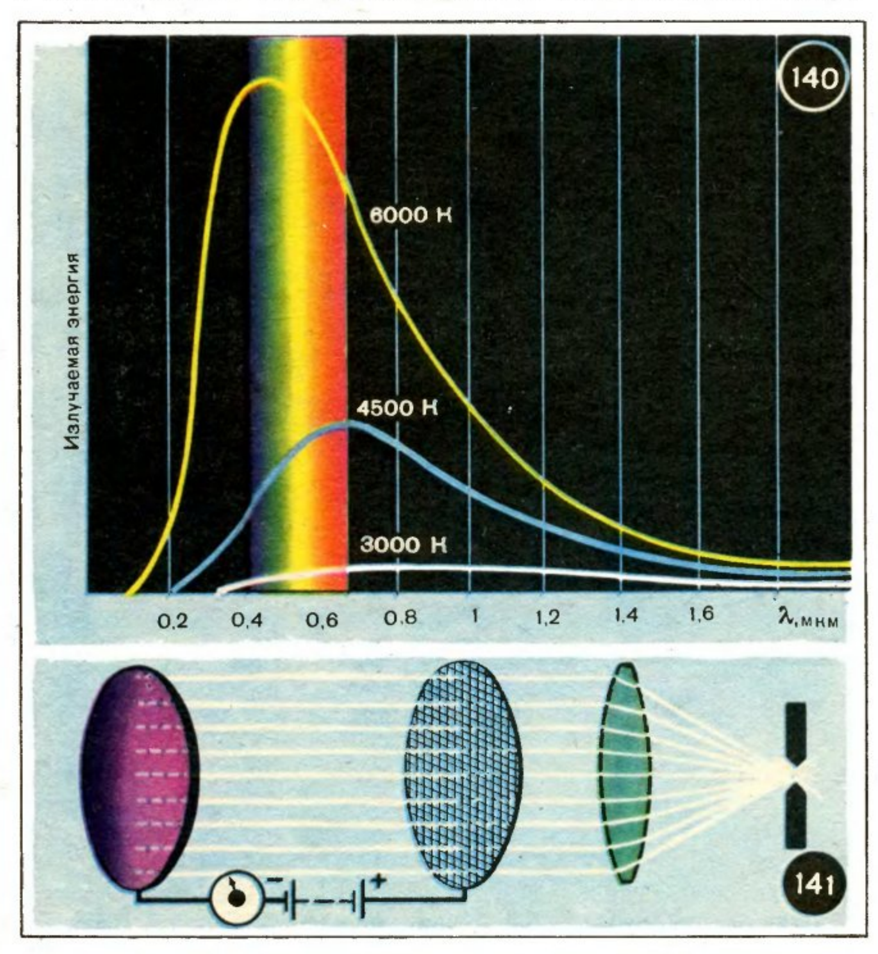
$$h \approx 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Джоуль есть единица энергии и работы. Произведение работы на время выражает в механике особую величину, называемую «действием». Поэтому квантовую постоянную называют иногда также «квантом действия». Введение этой постоянной в довольно сложную формулу закона распределения энергии по частотам, которую мы приводить не будем, позволило Планку привести

теоретические и практические выводы законов излучения в полное соответствие.

Легко запоминается и дата рождения квантовой теории — 1900 г., начало нового века.

Дальнейшее развитие квантовая теория получила в истолковании явлений фотоэффекта. Явление фотоэффекта было открыто еще до появления квантовой теории. Оно было открыто в 1887 г. Г. Герцем и обстоятельно изучено русским ученым А. Г. Столетовым. Установка Столетова изображена на рисунке 141. Два металлических диска, один из которых сплошной, а другой в виде сетки, установлены параллельно друг другу и включены в электрическую цепь. Поскольку диски не касаются друг друга, цепь разомкнута и стрелка гальванометра находится на нуле. При освещении диска лучами электрической дуги в цепи возникает ток, обнаруживаемый гальванометром. Непре-



менное условие: сплошной диск должен быть соединен с отрицательным полюсом батареи, в случае соединения его с положительным полюсом ток не возникает при освещении диска. Столетов установил при этом следующий закон: сила фототока прямо пропорциональна падающему на диск световому потоку. Мы знаем теперь объяснение этого явления: свет, падающий на сплошную отрицательно заряженную пластинку, вырывает из нее электроны, которые устремляются к положительно заряженной сетке. Дальнейшее исследование явления обнаружило два обстоятельства. 1) Для каждого вещества существует определенная длина световой волны, выше которой эффекта выбивания электронов не наблюдается. Так, для цинка длина волны равна 0,37 мкм (ультрафиолетовый свет), для калия — 0,45 мкм, для натрия — 0,68 мкм. 2) Энергия, а следовательно, и скорость электронов, выбиваемых из металла, зависит только от длины волны падающего света и не зависит от его интенсивности. Волновая теория была бессильна объяснить эти закономерности.

Объяснение было дано Эйнштейном на основе новых идей Планка о квантах. Эйнштейн пришел к выводу, что свет не только испускается и поглощается, но и распространяется порциями (квантами). Световые кванты получили название фотонов. Скорость фотонов равна скорости света в вакууме. В световом пучке имеется огромное количество фотонов. Отдельный фотон несет ничтожно малую энергию, с нашей точки зрения. Но все дело в масштабе — в мире молекул и атомов удар фотона можно сравнить с действием крупнокалиберного артиллерийского снаряда в нашем мире (макромире), особенно если речь идет о фотоне ультрафиолетовых, рентгеновских или гамма-лучей. Ведь энергия фотона зависит от частоты колебаний. Для ультрафиолетовых лучей она в несколько раз больше, чем для длинноволновой части спектра.

Энергия фотона $\varepsilon = h\nu$ при его попадании в металл тратится на разрыв связи электрона с атомом (A) и на сообщение вырванному из атома электрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$. Таким образом, закон сохранения энергии выразится уравнением

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где A — работа выхода; она имеет разные значения для различных металлов.

Кванты неделимы. Когда молекула металла поглощает свет, то это поглощение происходит только целыми квантами. Ослабляя интенсивность потока света, мы оставляем действие каждого кванта прежним и только уменьшаем число квантов.

Квантовая теория света не противоречит волновой теории, как противоречила некогда корпускулярная теория Ньютона теории волнообразного колебания эфира Гюйгенса. Сама формула энергии кванта связана с волновыми представлениями, так как содержит в себе чисто волновую величину — частоту колебаний. Не представляет ли собой эта теория возврат к корпускулярной теории Ньютона, где свет рассматривался как поток светоносных частиц? Сходство фотонов с частицами вещества действительно большое: фотоны, как и вещественные частицы, являются носителями энергии. Они имеют и импульс. Импульс p и энергия ε фотона связаны друг с другом соотношением

$$\varepsilon = pc,$$

где c — скорость света в вакууме.

Но фотон не частица вещества. Это вытекает из теории относительности Эйнштейна. Фотон может существовать только в движении со скоростью света. Остановка кванта света сопровождается превращением энергии кванта в другой какой-нибудь вид энергии. Поглощенный молекулой квант прекращает свое самостоятельное существование. Солнце не является «складом» фотонов. Фотоны возникают в процессе испускания света.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ПРЕВОСХОДЯЩАЯ ФАНТАЗИЮ

ЛАЗЕРЫ

Острый тонкий пучок лучей рубинового цвета прорезал пространство... Миновав земную атмосферу, он устремляется в космос к далеким звездным мирам.

Давление света, сконцентрированного на малой площадке, достигает миллиона атмосфер. Лучом можно проколоть или разрезать металлический лист из самого твердого и тугоплавкого металла.

Фантастика? Нет, это последнее достижение квантовой электроники, известное под названием «лазер» или, иначе, «оптический квантовый генератор». Лазеры появились в 1960 г. Их появлению предшествовали фундаментальные работы советских ученых В. А. Фабриканта, Н. Г. Басова, А. М. Прохорова, американского ученого Ч. Таунса. В частности, лазеры нашли применение для сверхдальней связи. Они позволили исследовать поверхность Луны, их устанавливают на искусственных спутниках Земли и на космических кораблях. В пути лазеры передают сигналы на Землю с расстояния в десятки миллионов кило-

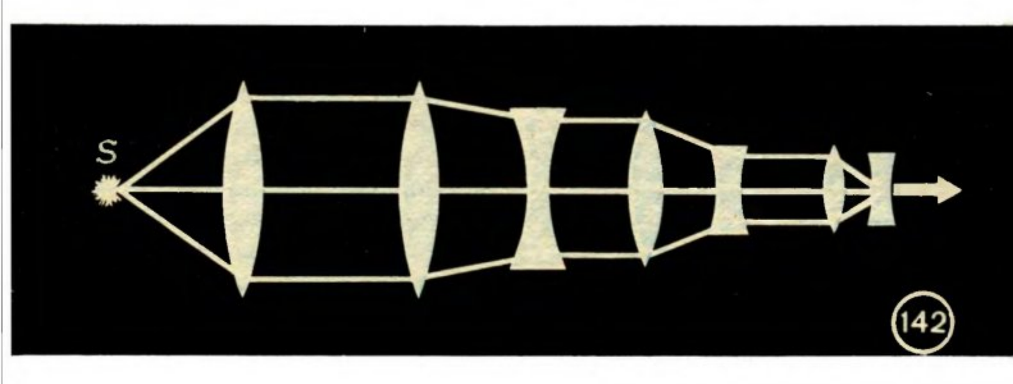
метров и позволяют управлять движением кораблей и корректировать их траекторию.

Не правда ли, перед таким достижением науки и техники бледнеет самая смелая фантазия?

Мечта о концентрации энергии света зародилась еще в глубокой древности. Отражение ее мы находим в известной легенде об Архимеде, сжегшем направленными при помощи зеркал лучами солнца корабли римского флота во время осады Сиракуз.

А кто не читал фантастический роман А. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина»? Гиперболоид, при помощи которого его изобретатель инженер Гарин хотел стать властелином мира.

В фантастической литературе можно найти много описаний действия лучей разрушения и смерти. Все они, однако, включая и гиперболоид инженера Гарина, грешат против законов физики и прежде всего против основного ее закона — закона сохранения



энергии. Невозможно путем обычных средств современной оптики — нагромождением только зеркал, линз или призм — беспредельно концентрировать энергию имеющихся в распоряжении современной техники источников света. Нельзя сконцентрировать при помощи зеркала солнечные лучи в один тонкий, как игла, луч и послать его на расстояние в несколько километров. Расчет показывает, что для объекта, находящегося от зеркала на расстоянии всего 1 км, потребовалось бы зеркало диаметром 500 м, а для того чтобы вызвать загорание дерева, надо было бы обладать источником света, яркость которого в миллион раз превышает яркость Солнца.

Как показал Г. Г. Слюсарев в своей книге «О возможном и невозможном в оптике», нельзя в действительности получить пучок параллельных лучей и еще сжать его в узкий шнур, например по схеме, представленной на рисунке 142. В схемах геометрической оптики мы, конечно, пользуемся понятием точечного источника света, который, будучи помещен в главном фокусе

вогнутого зеркала (притом параболического, а не гиперболического, как ошибочно полагал инженер Гарин) или в главном фокусе линзы, дает на чертеже пучок параллельных лучей. Но это только на чертеже, в действительности же точечный источник немыслим. Немыслим и пучок параллельных лучей. Приводимый в книге расчет доказывает математически, что если бы параллельные лучи и были возможны, то они не несли бы с собой никакой энергии. Доказательство основывается на законах оптики, вытекающих из закона сохранения энергии. Все фантастические проекты сжигания на расстоянии не учитывают этого закона, не говоря уж о законах рассеяния, дифракции и интерференции света.

Посмотрим теперь, как же решается задача генерации когерентного света при помощи лазеров. Эти новые источники света действительно излучают почти (опять же почти, но не полностью!) параллельные лучи. Но физическая основа их совершенно иная, чем основа оптических систем, о которых мечтали фантасты.

Взгляните на какой-нибудь из обычных источников света — пламя свечи, раскаленный волосок электрической лампочки или люминесцентную трубку. Какие физические явления составляют сущность излучения света этими источниками? В наших беседах мы уже не раз касались этого вопроса. Излучение света источником — это освобождение энергии при перескоках электронов с внешних орбит на орбиты, расположенные ближе к ядру. Тепловые движения частиц в раскаленном теле или высокое напряжение в газосветных трубках забросило электроны на внешние орбиты и привело атомы в «возбужденное» состояние. Это состояние неустойчиво, и почти мгновенно (через 10^{-8} с) электроны возвращаются на свои нормальные орбиты, отдавая при этом сообщенный им излишек энергии в виде квантов излучения.

В зависимости от порции энергии, отдаваемой электроном при переходе с одной орбиты на другую, или, другими словами, при переходе атома с уровня энергии E_2 на уровень E_1, частота ν излучаемого фотона может быть вычислена по формуле (ее связывают с именем знаменитого физика Бора):

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Поскольку длина волны λ связана с частотой ν соотношением $\lambda = \frac{c}{\nu}$, приходим отсюда к формуле:

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1}.$$

Чем ближе орбита, с которой происходит переход электрона, к «невозбужденной» орбите, тем меньше энергия кванта и тем больше длина волны излучения.

Теперь подумайте, какое громадное количество атомов участвует в процессе излучения света, скажем, свечой. Ведь в ничтожном объеме вещества размером с булавочную головку заключаются миллиарды миллиардов атомов. Возбуждение их происходит неодновременно, поэтому и отдача энергии возвращающимися на свои нормальные орбиты электронами происходит неодновременно, а случайно, беспорядочно, с излучением различных квантов с различными длинами волн, словно нестройный многоголосый хор, который создает невообразимый шум, когда каждый поет свое, кто во что горазд.

Теперь рассмотрим, какие процессы происходят в лазере. Они приводят к тому, что вместо хаотического (некогерентного) светового излучения рождается в высокой степени упорядоченное (когерентное) излучение, характеризующееся монохроматичностью и высокой направленностью.

Как возникает такое излучение? Предположим, что на некоторое вещество падает фотон, энергия которого равна разности энергий уровней атомов вещества ($h\nu = E_2 - E_1$). Если атомы вещества находились в невозбужденном состоянии, т. е. на уровне E_1, то произойдет поглощение фотона, сопровождающееся переходом атома с уровня E_1 на уровень E_2. Если атомы вещества находились в возбужденном состоянии, т. е. на уровне E_2, то рассматриваемый фотон не поглощается, а вызывает (инициирует) переход атома с уровня E_2 на уровень E_1 с испусканием еще одного фотона. Этот процесс называют вынужденным или индуцированным испусканием, поскольку он происходит не сам по себе, не самопроизвольно, а под влиянием внешнего воздействия (со стороны фотона). Существенно, что родившийся при вынужденном испускании фотон имеет такие же точно характеристики, что и первичный фотон,— не только такую же энергию, но и такое же направление движения. Конечно, наряду с процессами вынужденного испускания, возможно также и самопроизвольное испускание (его называют спонтанным) — когда атомы возвращаются с уровня E_2 на уровень E_1 сами по себе, без внешнего воздействия. Таким образом, возможны три основных процесса: 1) поглощение фотона невозбужденным атомом (рис. 143, *а*), 2) спонтанное испускание фотона возбужденным атомом (рис. 143, *б*), 3) вынужденное испускание фотона возбужденным атомом (рис. 143, *в*).

Процесс вынужденного испускания света играет в лазере принципиально важную роль. Пролетая мимо возбужденных атомов, вынужденно испущенные фотоны будут, в свою очередь,



Фабрикант Валентин Александрович
(р.1907)



143

3
2
1
Зеленый свет
от лампы накачки
Красный свет

144

Полупрозрачная посеребренная грань
Лампа накачки
Кристалл рубина
Лазерный луч

145



Басов Николай Геннадиевич
(р.1922)



Прохоров Александр Михайлович
(р.1916)

инициировать рождение новых и новых фотонов, так что может возникнуть целая лавина фотонов. И все они будут иметь одинаковую энергию, все они будут двигаться в одном направлении; времена их рождения будут не случайными, а согласованными. В результате и возникнет когерентное излучение.

Из сказанного ясно, что для работы лазера необходимо, прежде всего, чтобы процессы вынужденного испускания света преобладали над остальными процессами — над спонтанным испусканием света и над поглощением света. Мы уже отмечали, что поглощение света происходит, когда атом находится в невозбужденном состоянии, тогда как для вынужденного испускания необходимо, чтобы атом находился в возбужденном состоянии. Значит, для преобладания вынужденного испускания над поглощением надо, чтобы в возбужденном состоянии находилось больше атомов, чем в невозбужденном. В обычных условиях «заселенность» энергетических уровней убывает в направлении от более низких к более высоким уровням. Нам важно, чтобы имела место обратная ситуация — надо, чтобы на уровне E_2 находилось больше атомов, чем на уровне E_1. Такое распределение атомов по энергетическим уровням называют обращенным или инвертированным. В этом случае говорят, что имеется инверсия заселенностей энергетических уровней.

Итак, необходимо реализовать состояние инверсии. На практике это состояние реализуют, например, в рубине. Речь идет о том самом рубине, который хорошо известен как драгоценный камень, используемый в качестве украшения для колец, брошек и других ювелирных изделий. Рубин представляет собой оксид алюминия, в кристаллической решетке которого небольшая часть атомов алюминия замещена ионами хрома (примесь хрома составляет от 0,05 до 0,5%). Хром поглощает излучение желтого и зеленого участков спектра и пропускает красный и оранжевый цвета. Этим объясняется великолепный красный цвет рубина. В настоящее время кристаллы рубина выращивают искусственно.

Ионы хрома являются как раз теми самыми частицами, высвечивание которых и приводит в конечном счете к возникновению лазерного луча в рубиновом лазере. Для возбуждения ионов хрома используют вспомогательное излучение — от специальной газоразрядной лампы на ксеноне. Лампа работает по тому же принципу, что и лампы-вспышки, применяемые фотографами. Импульсы света, испускаемого лампой, поглощаются рубином или, точнее говоря, ионами хрома в рубине. Эту лампу принято называть лампой накачки.

На рисунке 144 показаны три энергетических уровня иона хрома; они обозначены цифрами *1, 2, 3*. Поглотив фотон зелено-

го цвета, испущенный лампой накачки, ион хрома переходит с уровня *1* на уровень *3*. Там он остается весьма недолго (около 10^{-8} с) и затем спонтанно переходит на уровень *2*. Избыток энергии превращается в колебательную энергию кристаллической решетки рубина. На уровне *2* ионы хрома могут оставаться без внешнего воздействия относительно долго — до 10^{-3} с. За это уровень *2* получил название метастабильного (почти стабильного) уровня. В результате оказывается возможным накопление ионов на уровне *2* и создание инверсии — когда на уровне *2* находится больше ионов, чем на уровне *1*.

Теперь рассмотрим следующий вопрос: каким образом можно добиться того, чтобы вынужденное испускание в каком-то определенном направлении в пространстве существенно преобладало над спонтанным испусканием, которое происходит во все стороны? Это очень важный вопрос. Ведь любой фотон, испущенный ионом хрома при спонтанном переходе с уровня *2* на уровень *1*, способен инициировать рождение целой лавины вынужденно испущенных фотонов. Ясно, что эта фотонная лавина будет распространяться в том же направлении, в котором летел первичный спонтанный фотон. Поскольку спонтанные фотоны могут вылетать в самых различных направлениях, то, следовательно, и инициированные ими фотонные лавины будут распространяться также в разных направлениях. Необходимо каким-то образом ограничить развитие всех этих фотонных лавин, создав в то же время наиболее благоприятные условия для развития только одной фотонной лавины — лавины, распространяющейся в некотором определенном (выделенном) направлении. Для этого рубиновый кристалл изготавливают в виде цилиндрического стержня (толщиной с карандаш и длиной до 10 см), торцы стержня обтачивают строго параллельно друг другу, тщательно полируют, а затем серебрят так, чтобы они образовали два взаимно параллельных зеркальца. С одного конца стержня серебрение делают плотное, с другого полупрозрачное. Направление оси рубинового стержня и является тем самым выделенным направлением, вдоль которого и будет реализована генерация лазерного излучения. Очевидно, что если спонтанный фотон случайно вылетит под углом к указанному направлению, то он очень быстро покинет стержень (через его боковую стенку), так что соответствующая фотонная лавина не успеет развиться. Если спонтанный фотон случайно родится в направлении оси рубинового стержня, то он пройдет всю длину стержня, которая фактически многократно возрастает вследствие многих последовательных отражений излучения от зеркальных торцов стержня.

На рисунке 145 представлен схематически лазер на рубине. Рубиновый стержень (активный элемент лазера) обвит спираль-

Плотно-посеребренная грань

Полупрозрачная-посеребренная грань

А

Б

В

Г

Д

Е

ной трубкой лампы накачки. Лазерное излучение выходит с торца стержня с полупрозрачным посеребрением.

На рисунке 146 изображены последовательно стадии описанного выше процесса: А) первоначально ионы хрома находятся в невозбужденном состоянии, т. е. на уровне *1* (черные точки на рисунке); Б) накачка светом ксеноновой лампы-вспышки (беспорядочные стрелки на рисунке) переводит большую часть ионов хрома в возбужденное состояние, в результате чего они накапливаются на уровне *2*; В) зарождается фотонная лавина, инициированная фотонами, спонтанно родившимися вдоль оси кристалла; Г) и Д) фотонная лавина отражается попеременно от торцов кристалла и, проходя большой путь в кристалле, значительно усиливается; Е) высвечивается лазерный импульс.

В данной беседе мы ограничились описанием только лазера на рубине, работающего в импульсном режиме. Таков был первый лазер, созданный в 1960 г. С тех пор было создано множество разнообразных типов лазеров, работающих в различных режимах. Существуют непрерывно накачиваемые лазеры (энергия возбуждения поступает в активный элемент лазера непрерывно), излучение которых имеет вид либо непрерывного светового потока, либо регулярной последовательности световых импульсов. Частота следования лазерных импульсов может быть очень высокой — до 10^7 импульсов в секунду. Лазеры с импульсной накачкой (энергия возбуждения поступает в активный элемент отдельными импульсами) могут излучать «гигантские импульсы» (длительность импульса 10^{-8} с, интенсивность импульса в максимуме до 10^6 кВт), а также сверхкороткие световые импульсы (длительность импульса 10^{-12} с, интенсивность в максимуме до 10^9 кВт). В качестве активных элементов лазеров применяются различные кристаллы, стекла, полупроводниковые материалы, жидкости, а также газовые среды. Для возбуждения газовых активных сред используется электрический разряд в газе.

Укажем основные типы лазеров: а) твердотельные (на рубине, на гранатах или стеклах, активированных неодимом); б) газоразрядные (на смеси гелия и неона, на ионизованном аргоне, на углекислом газе); в) жидкостные (на растворах органических красителей); г) полупроводниковые (на чистых полупроводниках, на контактирующих друг с другом примесных полупроводниках разного типа); д) химические (на газовых смесях, в которых происходят химические реакции с выделением энергии); е) газодинамические (на реактивной струе газа). Существуют и другие типы лазеров. Однако уже этого беглого перечня вполне достаточно, чтобы почувствовать, насколько разнообразны лазеры.

ЛАЗЕРЫ ОБРАБАТЫВАЮТ МАТЕРИАЛЫ

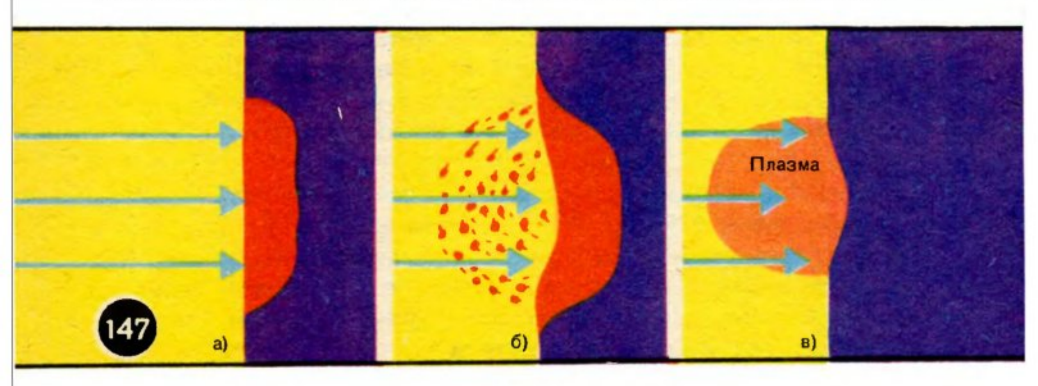
Сегодня трудно даже перечислить всевозможные применения лазеров в науке и технике. Лазеры используются в современной измерительной технике — для оптической локации, в геодезии, для сверхточных измерений расстояний, линейных и угловых скоростей, ускорений. Все шире внедряются в практику лазерные методы контроля за состоянием атмосферы (степень и характер ее загрязненности), качеством различных изделий, наличием в тех или иных деталях высоких механических напряжений или внутренних дефектов. Развиваются системы лазерной связи (наземные, подводные, космические). Лазерное излучение начинают использовать и в современных вычислительных комплексах — для хранения, поиска, передачи и обработки информации. Накоплен большой материал по эффективному применению лазеров в медицине; созданы лазерные установки для выполнения самых различных хирургических операций, включая операции на человеческом глазе. Всего и не перечислишь. Наиболее широко лазеры используются для обработки материалов. Именно этим применениям лазеров мы и уделим внимание в данной беседе.

Лазерный луч можно сфокусировать в световое пятно, имеющее диаметр всего 10 мкм. В результате удается реализовать очень высокую плотность световой мощности в пределах маленького участка поверхности. Предположим, что мощность непрерывно генерирующего лазера составляет 0,1 кВт. Фокусируя излучение лазера в пятно диаметром 10 мкм, мы получим плотность световой мощности (в пределах пятна), равную 10^5 кВт/см^2.

Рассмотрим физические процессы, возникающие в веществе при воздействии на его поверхность мощного лазерного излучения. Когда плотность мощности, возрастая, достигает значений порядка 10^2 кВт/см^2, начинается плавление материала. По мере поступления световой энергии граница между жидкой и твердой фазами постепенно перемещается в глубь материала (рис. 147, *а*). При этом площадь поверхности рассматриваемой границы увеличивается, теплота начинает более интенсивно отводиться в глубинные слои за счет процесса теплопроводности, в результате устанавливается определенная (в дальнейшем не меняющаяся) граница между жидкой и твердой фазами. Повысим плотность световой мощности, падающей на поверхность материала, до 10^3-10^4 кВт/см^2. Теперь, наряду с плавлением, будет происходить интенсивное испарение (кипение) материала. Часть вещества перейдет в парообразное состояние, и на поверхности материала образуется лунка, начнет формироваться отверстие

(рис. 147, *б*). При дальнейшем повышении плотности световой мощности (до 10^6 кВт/см^2 и выше) начнется ионизация паров вещества светом, в результате чего образуется высокотемпературная плазма. Возникнув, плазма начинает преграждать доступ излучению к поверхности материала (рис. 147, *в*), поскольку излучение сильно поглощается в плазме. Для обработки материалов важно, чтобы плазма не возникала; поэтому используемые в лазерных установках плотности световой мощности не должны быть чрезмерно большими.

До сих пор мы говорили о концентрации световой мощности в пространстве. Надо принимать во внимание также и концентрацию световой мощности во времени. Этой концентрацией управляют, изменяя длительность одиночных световых импульсов или частоту следования импульсов. Допустим, что плотность мощности достаточно высока для того, чтобы происходило не



только плавление, но и интенсивное испарение материала. Пусть при этом лазерное излучение имеет вид одиночных импульсов света достаточно короткой длительности, например 10^{-7} с. В этом случае в материале поглощается большое количество световой энергии за очень малое время. За такое время поверхность, разграничивающая жидкую и твердую фазы вещества, не успевает переместиться в более глубокие слои материала; в результате еще до того, как будет расплавлена сколь-либо заметная масса вещества, начнется его интенсивное испарение. В подобных условиях основная доля поглощаемой веществом световой мощности будет расходоваться не на плавление, а на испарение.

В зависимости от вида обработки и свойств конкретного материала используют лазерное излучение с теми или иными характеристиками.

Если, например, для сварки подходят относительно менее интенсивные и в то же время более длительные лазерные импульсы (длительностью 10^{-3} с), то для пробива-

ния отверстий, где важно интенсивное испарение материала, подходят более интенсивные и более короткие импульсы ($10^{-4}-10^{-5}$ с).

Применяются различные виды лазерной обработки материалов: сварка, термообработка, резание, пробивание отверстий, удаление части материала.

Сварка лазерным лучом обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими видами сварки. Предположим, например, что надо приварить какую-то деталь внутри отпаянного вакуумного объема. Пусть это будет стеклянный баллон какого-нибудь электровакуумного прибора. Фокусируя лазерный луч внутрь баллона в нужном месте, можно выполнить необходимый ремонт, не снимая самого баллона (рис. 148). Лазерным лучом можно производить сварку в различных труднодоступных местах (рис. 149). При такой сварке происходит быстро и с высокой точностью проплавление в заданной точке или вдоль заданной линии. Подвергающаяся тепловому воздействию зона имеет очень малые размеры, что важно, в частности, в тех случаях, когда сварка производится в непосредственной близости от чувствительных к нагреву элементов.

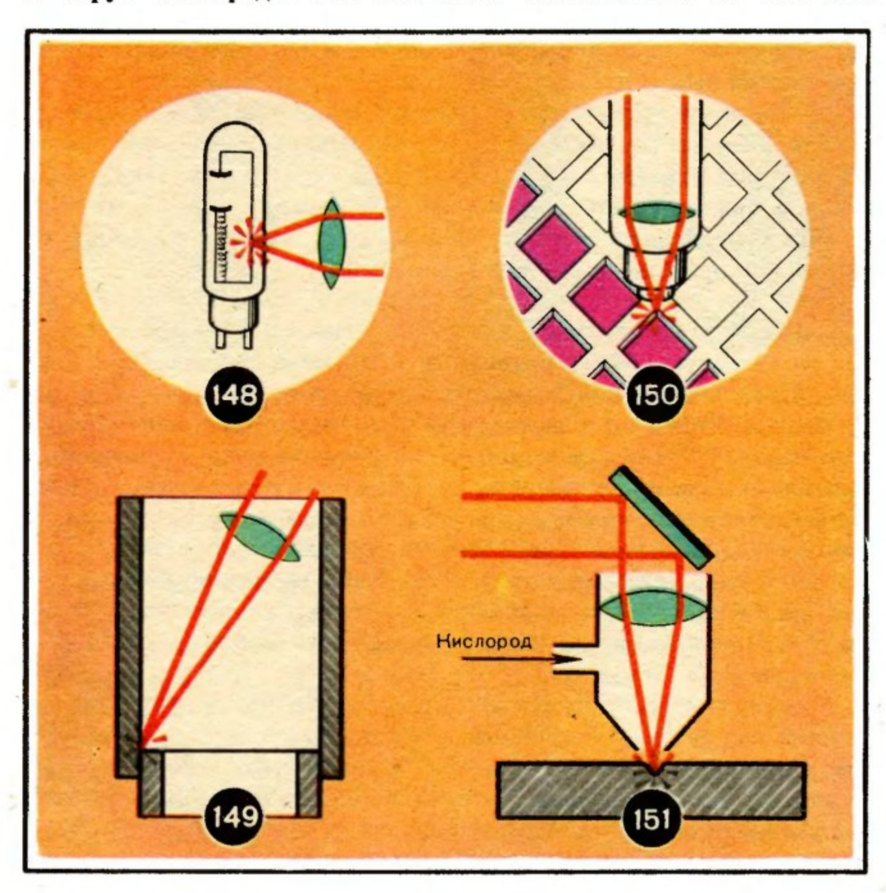
С помощью лазеров выполняют не только микросварку, но и сварку больших деталей, например приваривание наконечников к лопастям газовых турбин, режущих кромок из закаленной стали к полотнам металлорежущих пил, сварку кузовов автомобилей, газопроводов и т. д. С помощью лазера сваривают не только металлы, но и стеклянные изделия.

При облучении лазером поверхности металла происходит очень быстрое нагревание тонкого поверхностного слоя в том месте, куда сфокусирован лазерный луч. По мере перемещения луча на другие участки поверхности происходит столь же быстрое остывание нагретого участка. Это используют для закалки поверхностных слоев, приводящей к существенному повышению прочности. Лазерная закалка позволяет осуществлять избирательное повышение прочности определенных участков поверхности — тех, которые в наибольшей степени подвергаются износу. Например, лазерную закалку с успехом применяют в автомобилестроении — для упрочнения головок цилиндров двигателей, шестерен, направляющих клапанов, распределительных валов.

На рисунке 150 изображен процесс лазерного резания нержавеющей стали. С помощью лазеров можно быстро и хорошо разрезать самые разнообразные материалы — от листов металла, керамики, стекла до фанеры, бумаги, обычной ткани. При этом получают тонкие и точные размеры, а также разрезы по сложному профилю в двух и даже в трех измерениях.

В зависимости от характера разрезаемого материала и толщины образца используют лазеры различной мощности. Например, для разрезания листов фанеры толщиной 25 мм применяют лазеры с непрерывной генерацией, имеющие мощность излучения около 5 кВт; при этом скорость резания составляет 2 м/мин. Для раскроя тканей применяются лазеры мощностью 100 Вт; автоматизированные лазерные системы позволяют в течение одного часа раскроить материал для 50—100 костюмов. Раскрой осуществляется с высокой точностью, при этом обеспечивается хорошее качество краев разреза.

При резании металлов лазерным лучом часто применяют одновременный обдув разреза струей кислорода (так называемое газолазерное резание). Схема резака показана на рисунке 151. Значительная часть энергии, затрачиваемой на резание, получается в данном случае за счет химических реакций, в которые вступают металл и кислород, т. е. в результате горения металла в струе кислорода. Это позволяет использовать не слишком



мощные лазеры — со средней мощностью излучения 0,1—1 кВт. Кроме того, струя кислорода подхватывает и уносит из зоны резания расплав вместе с продуктами сгорания металла, а также охлаждает прилегающие к зоне резания участки. В результате увеличиваются глубина и скорость резания. Непрерывно генерирующий лазер мощностью 3 кВт разрезает лист титана толщиной 5 см со скоростью 0,5 м/мин. При применении кислородного поддува тот же результат достигается при мощности излучения 0,3 кВт.

Лазеры широко используются сегодня для пробивания отверстий в различных материалах. Для лазерного пробивания отверстий характерна высокая точность, с какой фиксируются положения отверстий, возможность ориентировки отверстия фактически в любом направлении. Лазером можно пробить отверстие очень малого диаметра — 0,1—0,5 мм. С помощью лазеров получают отверстия в очень хрупких материалах, например в керамических плитах, а также в очень твердых материалах, например в алмазах, предназначенных для применения в качестве фильер для протягивания проволоки. Заметим, что вследствие высокой хрупкости керамики сверление обычными методами выполняют обычно на «сыром» материале — до того, как он подвергнется обжигу. Естественно, что при обжиге размеры изделия и положения отверстий на поверхности изделия могут немного измениться. Лазерное пробивание отверстий производят уже после обжига, поэтому здесь подобных проблем не возникает. При этом можно пробивать отверстия, расположенные вблизи друг от друга, а также в непосредственной близости от края пластины.

Все более широкое применение находят лазеры в микроэлектронике. Лазерная микросварка используется при изготовлении различных компонентов электронных схем, а также для подгонки параметров компонентов к заданному номиналу. При изготовлении компонентов схемы сфокусированным лазерным лучом убирают (за счет испарения) часть металлической или полупроводниковой пленки, нанесенной на диэлектрическую подложку. С помощью лазерного луча можно изготовить целиком тонкопленочную схему со всеми располагающимися на ней резисторами и конденсаторами. Лазеры используют также для изготовления и подгонки фотошаблонов, применяемых для травления микросхем.

Трудно перечислить всевозможные применения лазеров. Лазерным лучом делают «надрезы» на различных поверхностях, ставят клейма, зачищают провода от изоляции. И всякий раз лазерный луч применяется там, где требуется особо «тонкая» работа, где механические средства обработки оказываются грубыми или попросту непригодными.

МОЖНО ЛИ ЗАМОРОЗИТЬ СВЕТОВУЮ ВОЛНУ?

ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Чтобы подольше сохранить овощи или фрукты, их замораживают. В таком виде они могут долгое время храниться в холодильнике. Затем их вынимают и восстанавливают (т. е. размораживают), после чего овощи и фрукты приобретают почти такие же свойства, что и свежие продукты. Так поступают с овощами и фруктами. Но можно ли поступать подобным образом со световыми волнами? Предположим, что от некоего объекта отражается световая волна; она несет в себе информацию о внешнем виде объекта. Когда эта волна достигает наших глаз, мы воспринимаем зрительный образ объекта. Спрашивается, можно ли каким-то образом заморозить или законсервировать рассматриваемую световую волну? Можно ли затем (впоследствии) восстановить эту световую волну — с тем чтобы иметь возможность воспринимать зрительный образ объекта точно так, как мы его воспринимали раньше, т. е. объемно, реалистически?

Зрительные образы окружающих нас объектов создаются в результате воспринимаемых глазом световых волн, идущих к нам от этих объектов. Мы прекрасно знаем: чтобы иметь тот или иной зрительный образ, надо иметь соответствующий объект. А можно ли получить такой же зрительный образ, не имея перед собой самого объекта? Иначе говоря, можно ли создавать те или иные зрительные образы чисто искусственно — за счет восстановления или специального «изготовления» соответствующих световых волн?

Оказывается, все это можно делать. Этим занимается новое направление современной оптики, называемое голографией.

Голография стала развиваться благодаря появлению источников когерентного света — лазеров. Однако ее принципы были сформулированы еще до создания лазеров. В 1920 г. польский физик М. Вольфке опубликовал работу под названием «О возможности оптического изображения молекулярной решетки». В этой работе было показано, что, используя дифракционные картины при прохождении рентгеновских лучей через кристалл, можно восстановить оптическое изображение кристаллической решетки. К сожалению, работа Вольфке не нашла в свое время отклика у физиков. Можно сказать, что Вольфке выступил как предвестник голографии, не понятый и не поддержанный современниками. Идеи и принципы голографии были сформулированы в 1948 г. английским физиком Д. Габором, незнакомым в то время с работой Вольфке. Тогда же появился и термин «голограмма». Примечательно, что Габор пришел к идеям голографии,

занимаясь весьма практической задачей. Он разрабатывал методы улучшения разрешающей способности электронного микроскопа. Как научно-техническое направление голография начала развиваться лишь с появлением в 1960 г. лазеров. В 1961 г. американские физики Э. Лейт и Ю. Упатниекс предложили широко используемый ныне двухлучевой метод голографии (мы познакомимся с этим методом в данной беседе). В 1962 г. советский физик Ю. Н. Денисюк разработал метод голографии на основе использования толстослойных фотоэмульсий (трехмерные голограммы).

В чем же существо голографии? Чтобы ответить на этот вопрос, возьмем какой-нибудь объект, осветим его когерентным светом (от лазера) и поместим перед экраном со светочувствительным слоем, способным закреплять и сохранять изображение (будем называть этот экран фотодетектором). Одновременно направим на фотодетектор вспомогательную световую волну от того же лазера, каким освещается объект. Волну от объекта назовем объектной, а вспомогательную — опорной. На рисунке 152,*а* опорная волна есть плоская волна, падающая на поверхность фотодетектора под углом α. После проявления фотодетектор производит, на первый взгляд, впечатление засвеченного негатива; никакого даже отдаленного подобия изображения объекта не в состоянии уловить на нем самый зоркий глаз. И тем не менее этот «засвеченный негатив», называемый голограммой, хранит изображение объекта. Оно закодировано в той тонкой и сложной картине интерференционных полос, которая возникает (и закрепляется) на голограмме в результате сложения двух когерентных световых волн — объектной и опорной. Картина эта характеризуется весьма тонкой структурой; расстояния между интерференционными полосами могут быть порядка 0,001 мм. Чтобы изображение объекта сделать наблюдаемым, надо выполнить операцию считывания (восстановления) голограммы: осветить голограмму опорной волной, которая теперь называется считывающей (см. рис. 152, *б*). Как только такая волна осветит голограмму, поверхность последней просветлится, возникнет как бы «окошко», в котором наблюдатель увидит объемное, совершенно реалистичное изображение объекта. Восстановление (считывание) изображения происходит в результате дифракции когерентной считывающей световой волны на своеобразной дифракционной решетке, какую представляет собой система интерференционных полос, закрепленная на голограмме.

Мы видим, таким образом, что голографический метод получения изображений оказывается по самой своей сути двухэтапным. На первом этапе с объекта «снимают» голограмму (этап записи голограммы; см. рис. 152, *а*); на втором этапе с голо-

граммы восстанавливают наблюдаемое изображение объекта (этап считывания голограммы; см. рис. 152, *б*). Запись голограммы основывается на явлении интерференции когерентных световых волн, а считывание — на явлении дифракции световых волн.

Тонкость структуры интерференционной картины, закрепляемой на голограмме, требует использования фотоматериалов с очень высоким пространственным разрешением. Под последним понимают максимальное число параллельных линий на единице длины, обычно на одном миллиметре, которое позволяет различить (разрешить) данный материал. Пространственное разрешение голографических фотоматериалов должно быть не менее чем 1000 линий на миллиметре.

На рисунке 153 дана одна из практических схем записи голограммы. Источником всех используемых в схеме световых пучков является один и тот же лазер.

Чтобы лучше разобраться в сущности голографического метода получения изображений, рассмотрим два простых примера.

Первый пример. Пусть на голограмму (на этапе ее записи) падают две плоские волны, составляющие друг с другом угол α (рис. 154, *а*). Условимся считать волну *1* на рисунке объектной, а волну *2* опорной. Интерференция этих двух волн приведет к тому, что на голограмме будет зафиксирована система параллельных прямых полос, отстоящих друг от друга на расстояние $d=\lambda/\sin\alpha$ (рис. 155), где λ — длина волны света, α — угол, под которым встречаются друг с другом интерферирующие волны (будем называть его углом интерференции). На этапе считывания голограммы (см. рис. 154, *б*) считывающая волна *3* испытывает дифракцию, в результате чего возникают две дифрагированные световые волны (волны *4* и *5* на рисунке); они распространяются под углом φ к направлению считывающей волны. Этот угол будем называть углом дифракции. Он может быть определен из соотношения: $d\sin\varphi=\lambda$, где d — период дифракционной решетки, т. е. то самое значение d, которое входило в предыдущее равенство. Сравнивая эти два соотношения, заключаем, что $\varphi=\alpha$. Это значит, что угол дифракции равен углу интерференции.

В общем случае (когда объектная волна не является плоской) угол интерференции меняется по площади голограммы от точки к точке. Соответственно будет меняться и угол дифракции. Существенно, что в каждой точке голограммы угол дифракции всегда должен равняться углу интерференции.

Второй пример. На рисунке 156, *а* показана схема записи голограммы точечного объекта: *1* — объектная сферическая вол-

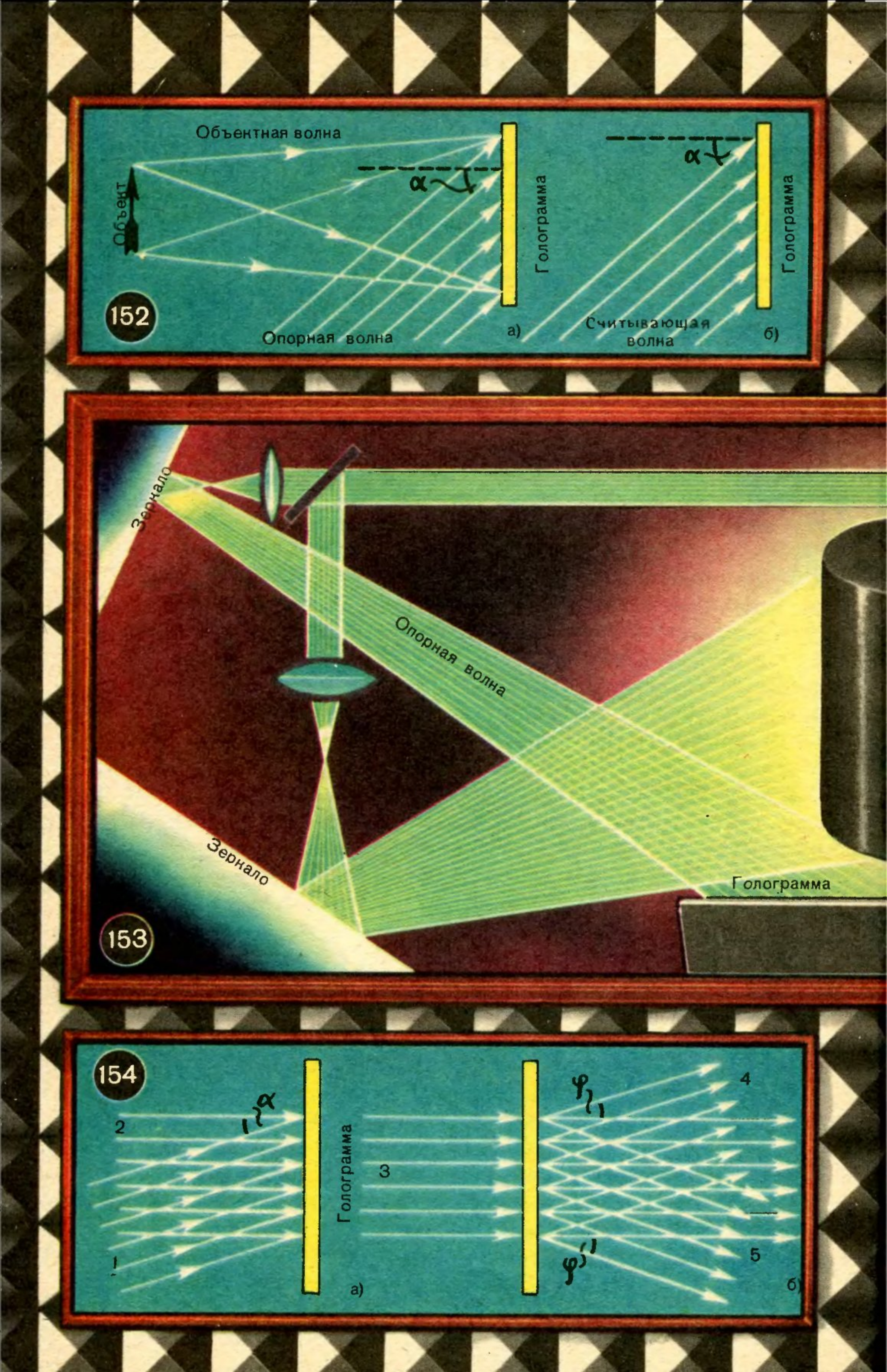
на, *2* — плоская опорная волна, распространяющаяся перпендикулярно к плоскости голограммы. Выделим два световых луча в объектной волне — лучи *AB* и *AC*. Для первого угол интерференции есть α_1, а для второго α_2. Считывание голограммы показано на рисунке 156, *б*. Дифракция световых лучей в точке *B* голограммы будет происходить под углом α_1, а в точке *C* — под углом α_2 (напомним: угол дифракции равен углу интерференции). Учитывая это, нетрудно построить ход дифрагированных световых лучей. В результате получаем два изображения объекта — мнимое (изображение A_1) и действительное (изображение A_2).

Обратим внимание на весьма принципиальное обстоятельство. На рисунке 156, *а* от объекта распространяется сферическая световая волна. Из рисунка 156, *б* видно, что одна из волн, распространяющихся от голограммы, есть как раз отмеченная выше волна. На этапе считывания голограммы уже нет объекта как такового, однако возникает световая волна, в точности такая же, какую отражал бы объект. В этом смысле правильнее говорить, что с голограммы восстанавливают не просто изображение объекта, а нечто существенно большее — объектную световую волну.

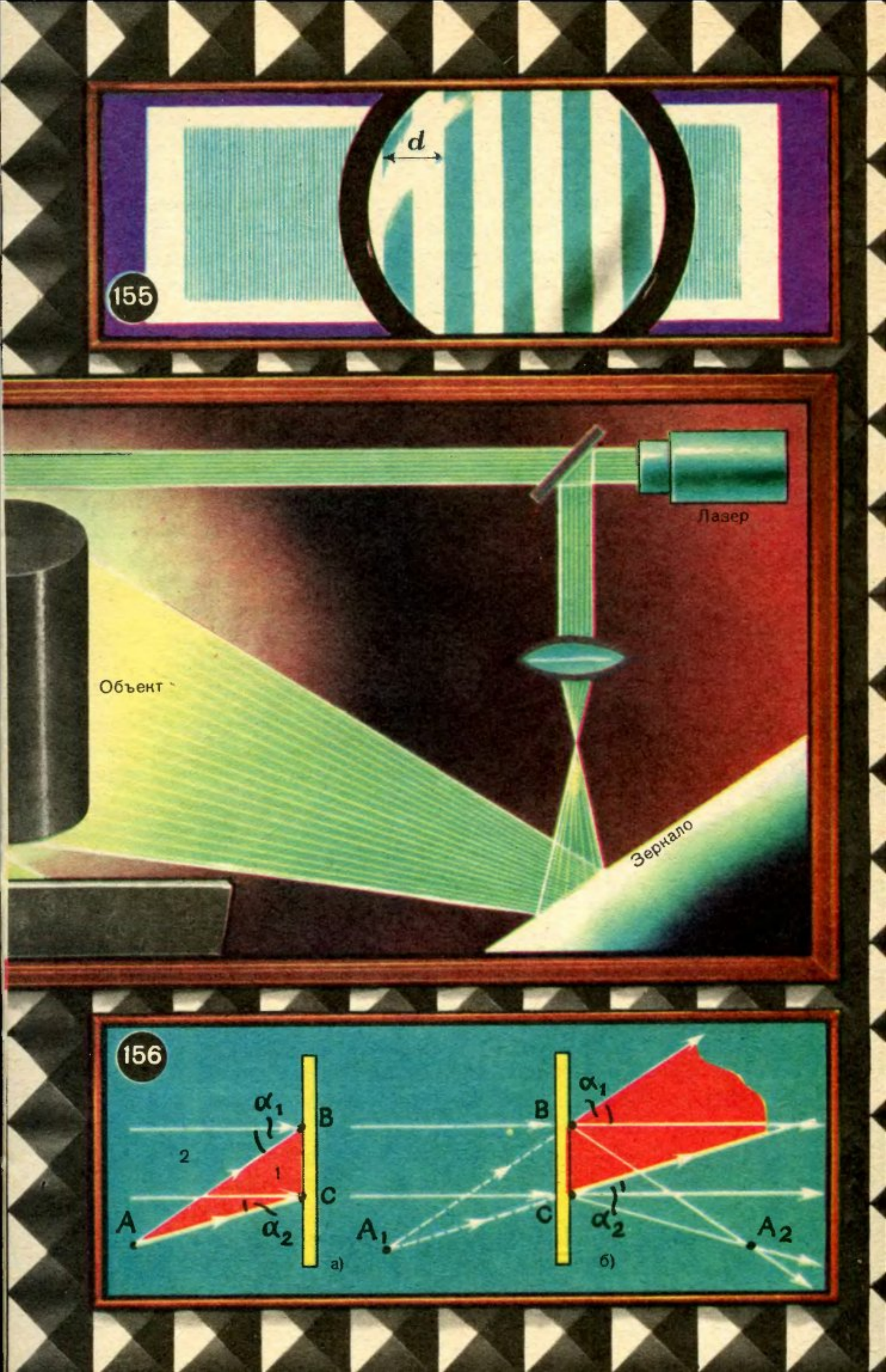
Факт восстановления с голограммы объектной световой волны не зависит, очевидно, от того, является ли объект точечным или это есть реальный трехмерный объект. Отсюда следует вывод: при считывании голограммы наблюдатель увидит не плоское (как на фотографии) изображение объекта, а как бы сам объект — объемно, реалистично, одним словом, так, как он видел объект во время записи голограммы. Смещая или наклоняя голову и тем самым меняя точку наблюдения, он обнаружит, что из-за рассматриваемого изображения объекта появляются другие объекты, располагающиеся на заднем плане, выступают новые детали, которые до этого загораживались объектом. Перед наблюдателем будет совершенно реалистичная трехмерная картина.

Заметим, что всеми признаками реального объекта обладает в данном случае только мнимое изображение. Действительное же изображение выглядит как бы «вывернутым наизнанку» — те точки, которые находились дальше от наблюдателя, представляются теперь расположенными ближе. Такое изображение называют псевдоскопичным. Если изменить схему считывания голограммы, посылая считывающую волну в направлении, строго обратном направлению опорной волны (надо освещать голограмму с обратной стороны), то тогда действительное изображение станет реалистичным, а мнимое будет псевдоскопичным.

Итак, мы убедились, что с голограммы можно восстановить не просто изображение объекта, а реальную световую волну, не-



Объектная волна
Объект
α
Голограмма
Опорная волна
а)
152
α
Голограмма
Считывающая волна
б)
Зеркало
Опорная волна
Зеркало
Голограмма
153
154
2
α
1
Голограмма
3
а)
φ
4
φ
5
б)


155
d
Лазер
Объект
Зеркало
156
α_1
B
2
1
C
A
α_2
а)
B
α_1
C
α_2'
A_1
A_2
б)

сущую в себе всю ту информацию, которая содержалась в световой волне, отраженной самим объектом. Теперь становится понятным термин «голография», который может быть переведен как «полная запись» (от греческих holos — весь, полный и grapho — пишу).

Поговорим теперь о достоинствах голографии, сравнивая ее с хорошо известным всем методом фотографирования. Группа людей снялась на память, причем были сделаны как обычная фотография, так и голограмма. Предположим, что случился пожар. И фотографию, и голограмму удалось спасти, однако у обоих снимков выгорело около трети площади. Через некоторое время потребовалось документально опознать одного из фотографировавшихся. Когда вынули фотографию, то оказалось, что это лицо там отсутствует; оно попало на сгоревшую часть. Тогда обратились к голограмме. Осветили ее лучом лазера и увидели всю группу лиц, включая и то лицо, которое требовалось опознать. Голограмма оказалась надежнее фотографии.

Этот случай приведен для того, чтобы проиллюстрировать важное обстоятельство: если уничтожение части поверхности фотографии обязательно приводит к потере некоторой (подчас очень существенной) информации, то уничтожение поверхности голограммы к этому не приводит. Действительно (см. рис. 156, *а*), информация об объекте записывается по всей площади голограммы. Любая точка поверхности объекта фиксируется не в определенном месте голограммы, а по всей ее площади. Можно уничтожить до трех четвертей площади голограммы; при этом лишь несколько ухудшится контрастность считываемого изображения.

Итак, запись на голограмму оказывается весьма надежным способом хранения информации. Возможно, что в будущем особо важную информацию будут хранить именно в виде голограмм.

На голограмме информация записана в виде интерференционной картины, т. е. в зашифрованном (закодированном) виде, и расшифровать ее способна лишь когерентная световая волна с точно таким же фронтом, какой был у опорной световой волны. Форма фронта опорной волны и есть тот ключ, без которого невозможно прочитать голограмму. Если форма фронта опорной волны неизвестна (а ведь эта форма может быть очень своеобразной — достаточно пропустить опорную волну через соответствующую «маску», искажающую волновой фронт), то даже самые опытные дешифровальщики не смогут прочитать голограмму.

Можно ли на одну и ту же фотопластинку записать несколько фотографических изображений? В принципе можно, хотя вряд ли кто захочет иметь фотографию, где несколько изобра-

жений наложены одно на другое. Еще более бессмысленно пробовать совмещать друг с другом несколько страниц текста. В этом проявляется определенная ограниченность фотографического способа хранения информации.

Голография снимает эти ограничения, внося тем самым очередную поправку в наши устоявшиеся представления. На одну и ту же голограмму можно записать много сцен (много интерференционных картин) и считывать их затем независимо друг от друга. Пусть, для простоты, опорная волна имеет плоский фронт. Будем записывать на одну и ту же голограмму разные сцены, меняя всякий раз углы, под которыми опорная волна падает на голограмму (иначе говоря, меняя ориентацию плоскости волнового фронта по отношению к плоскости голограммы). Для этого можно, например, менять ориентацию голограммы в опорном световом пучке. Для последующего считывания той или иной сцены надо лишь обеспечить соответствующую ориентацию голограммы относительно плоской считывающей волны. Оценки показывают, что на одной голограмме площадью 100 $см^2$ можно записать (при условии последующего уверенного считывания), по крайней мере, том Большой советской энциклопедии.

На фотографии изображен прыгун в воду, как бы застывший в воздухе в нескольких метрах над водой в немыслимом развороте. На другой фотографии под увеличением снята для некоторого момента времени сцена, заполненная движущимися пылинками; пылинки застыли в положениях, в которых их застал момент съемки. Мы говорим, что фотография способна «остановить мгновение». Предположим, что мы хотим знать, например, как в данный момент прыгун держит левую руку. Но на фотографии эта рука не видна. Хотелось бы поподробнее разглядеть пылинки на заднем плане сцены; однако на фотографии задний план получился нерезким. И тут, очевидно, ничего не поправишь.

Теперь представим, что вместо фотографий прыгуна и сцены с пылинками у нас имеются соответствующие голограммы, снятые для определенного момента времени. При считывании каждой из голограмм в непрерывном лазерном свете будет непрерывно (вновь и вновь) восстанавливаться реальная световая волна, тождественная той волне, которая отражалась от объекта наблюдения в момент съемки. И зрительное восприятие будет таким, как если бы прыгун вдруг действительно застыл в воздухе. То же относится и к сцене с пылинками. Теперь мы можем не торопясь наблюдать прыгуна с разных положений, можем менять настройку микроскопа и рассматривать то ближние, то дальние пылинки, изучать распределение пылинок в пространстве с разных точек. Мы видим, что в отличие от фотографии

голограмма в полном смысле слова «останавливает мгновение». Она непрерывно воспроизводит структуру световых волн, имевшую место в действительности лишь для какого-то момента времени.

— Все это прекрасно,— скажете вы.— Конечно, у голограммы очень много преимуществ перед фотографией. Но зато на фотографии «все видно», тогда как на голограмме ничего не увидишь, пока не осветишь ее лучом лазера. А если под рукой нет лазера?

— Ваше замечание справедливо. Поэтому-то и нет оснований ожидать, что голограмма везде вытеснит фотографию. Впрочем, надо заметить, что упомянутые ранее вскользь трехмерные голограммы Денисюка не нуждаются в лазере. Они считываются в солнечном свете, в световом пучке от проекционного аппарата и даже в свете обычной лампы накаливания. Лазер нужен только для записи этих голограмм.

— Что представляет собой трехмерная голограмма?

— В отличие от обычной голограммы, которую называют плоской (двумерной), эта голограмма записывается в объеме достаточно толстого слоя фотоэмульсии; толщина этого слоя во много раз превосходит длину световой волны. Если в обычной голограмме интерференционная картина имеет вид зафиксированных на плоскости интерференционных линий, то в трехмерной голограмме мы имеем дело с системою интерференционных поверхностей, зафиксированной в некотором объеме. Не входя в детали, заметим, что именно эта особенность трехмерных голограмм и позволяет считывать их в обычном свете.

Заканчивая беседу о голографии, отметим, что уже сегодня объемные голографические изображения (с полным или почти полным обзором) используются для создания эффектных реклам. Можно ожидать, что эти изображения будут широко применяться на театральной сцене, на цирковой арене. Экспериментально доказана возможность создания голографического кино. Очень заманчиво использование в учебниках и книгах по искусству объемных голографических иллюстраций. Вполне вероятно, что мы станем свидетелями изобретения голографического телевидения. Однако основные применения голографии (которые она находит в наши дни) — это применения, связанные с целенаправленным изменением световых полей, что важно для целей обработки информации, создания голографических запоминающих устройств, осуществления голографического контроля качества изделий (выявления внутренних дефектов и особо напряженных мест в образцах, деталях приборов, узлах различных конструкций) и т. д.

$E=mc^2$

На расстоянии почти 150 млн. км от нашей планеты сияет огнем своих лучей Солнце. Оно непрерывно излучает огромное количество энергии. На площадку 1 м^2, поставленную перпендикулярно к солнечным лучам, посылает оно каждую секунду энергию, равную 1,36 кДж. Полная излучаемая Солнцем мощность равна $4 \cdot 10^{23}$ кВт. Откуда же черпает оно такое, превосходящее всякое воображение, количество энергии? Ни одна из прежних теорий, искавших ответы на этот вопрос в падении на Солнце метеоритов или в сжатии солнечного шара, не могла выдержать проверку расчетом. В лучшем случае указанные источники могли бы обеспечить Солнце энергией на десятки или сотни миллионов лет. Лишь физика XX в. нашла удовлетворительное решение загадки Солнца. Источником солнечной энергии являются те самые термоядерные реакции, которые так волнуют современных ученых, реакции, овладение которыми и использование которых в мирных целях обеспечит человечество неисчерпаемыми запасами энергии.

Основная термоядерная реакция, обеспечивающая Солнце энергией, это реакция превращения водорода в гелий (точнее, протонов в ядра гелия, так как при чудовищной температуре 20 млн. градусов в недрах Солнца водород и гелий полностью ионизованы). Такая реакция совершается как при столкновениях протонов друг с другом (так называемый «протонный цикл»), так и при столкновениях, где наряду с протонами участвуют, в частности, ядра углерода («углеродный цикл»). В обоих случаях четыре протона превращаются в конечном счете в ядро гелия ^{4}He; при этом рождаются также позитроны, нейтрино, фотоны. Протонный цикл состоит из следующих превращений:

$$p+p \longrightarrow \mathrm{D}+e^{+}+\nu_e;$$
$$p+\mathrm{D} \longrightarrow {}^3\mathrm{He}+\gamma;$$
$${}^3\mathrm{He}+{}^3\mathrm{He} \longrightarrow {}^4\mathrm{He}+p+p.$$

Здесь p — протон, D — ядро тяжелого водорода (оно содержит протон и нейтрон; его называют также дейтроном), ^{3}He — ядро изотопа гелия, состоящее из двух протонов и одного нейтрона (ядро ^{4}He состоит из двух протонов и двух нейтронов), e^+ — позитрон (античастица электрона), ν_e — электронное нейтрино, γ — фотон.

Сравним массу ядерного вещества до и после реакции, в результате которой из четырех протонов получается ядро гелия. Не учитывая массу электронов, мы может принять массу «строительного материала» равной массе четырех протонов, т. е. $6{,}69 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса получившегося ядра гелия равна

$6{,}64 \cdot 10^{-27}$ кг. Баланс, как видите, не сходится. Масса «расходной» части (ядра водорода) оказывается больше «приходной» (ядра гелия) на $5 \cdot 10^{-29}$ кг, что в 50 раз больше неучтенной здесь массы позитрона (как и у электрона, она составляет $9 \cdot 10^{-31}$ кг). Этот факт получил название «дефекта массы» и буржуазными философами истолковывался как доказательство возможности превращения массы или даже материи в энергию. Но разве можно отрывать массу или энергию от материальных носителей этих свойств? Материю современная физика знает в двух формах: в форме вещества и в форме поля. В той и другой форме материя обладает массой и энергией. Энергия способна к превращениям, оставаясь при этом неуничтожимой (закон превращения и сохранения энергии), равным образом и масса способна к превращениям и точно так же подчиняется закону сохранения. Обнаруженный выше при подсчете «дефект массы» означает не уничтожение массы вещества, а лишь превращение ее в массу поля, массу квантов γ. Но что такое масса? Масса есть мера инертности материального объекта. В классической механике масса тела считалась постоянной, и потому очень легко было прийти к отождествлению ее с количеством вещества. В теории относительности масса не может считаться постоянной, она изменяется в зависимости от скорости движения тела.

Эйнштейн, которому физика обязана созданием теории относительности, дает для массы тела, движущегося со скоростью v, новую формулу:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — масса покоя.

В частности, для кванто света — фотонов — скорость движения v равна c (скорости распространения света в вакууме) и, следовательно, $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$. Тогда из предыдущей формулы следует, что $m_0 = 0$. Это значит, что фотоны не имеют массы покоя. Не может быть у фотона и никакой другой скорости, кроме скорости света. Скорость фотонов всегда одна и та же ($c = 300\,000$ км/с). «Как же так? — спросите вы.— Ведь когда свет проникает в какую-нибудь прозрачную материальную среду (стекло, воду и т. п.), то, как известно, он замедляется. Показатель преломления света как раз и показывает, во сколько раз скорость света в какой-нибудь среде меньше, чем в вакууме.

Например, в стекле в зависимости от его сорта скорость света в 1,5 раза меньше, чем в пустоте». Истолкование этого действительно существующего уменьшения скорости света таково. Каждый отдельный фотон и в стекле летит с такой же скоростью, как в пустоте, но при встрече с каким-нибудь атомом фотон поглощается им. Затем спустя некоторое время («время жизни возбужденного атома») этот атом испускает новый фотон. Вследствие таких «остановок» в пути следования средняя скорость света в среде оказывается меньше, чем скорость движения отдельных фотонов. Каждый, кому приходится ездить на пригородных поездах, знает, что средняя скорость поезда, идущего с большим количеством остановок, меньше, чем скорость поезда, движущегося безостановочно. Это сравнение страдает только тем недостатком, что для движения поезда с остановками большое значение имеет потеря времени на разгон и замедление около каждой остановки, тогда как ни об ускорении, ни о замедлении фотона речи быть не может.

Возникает также другой вопрос: что происходит с массой фотона при его поглощении каким-нибудь атомом? Не уничтожается ли здесь масса? Нет! Поглощенный фотон вызывает возмущение в системе поглотившего его атома, и масса возмущенного атома возрастает ровно на значение массы поглощенного фотона. При излучении атомом фотона его энергия и его масса уменьшаются на энергию и массу излучаемого фотона. Полная масса всех участвующих в описанных превращениях материальных частиц (вещества и поля) остается постоянной, равно как остается постоянной и их энергия.

Рассмотрим наиболее яркий пример превращения вещества в поле, пример аннигиляции (уничтожения) пары электрон—позитрон при их встрече. Позитрон e^+—элементарная частица с массой, равной массе электрона, но обладающая положительным зарядом, был открыт в 1932 г. сначала в космических лучах, а затем удалось наблюдать его и в лабораторных условиях. В земных условиях продолжительность жизни его ничтожна. Позитрон, пришелец из межзвездных просторов, проникая в земную атмосферу и проходя через вещество, теряет вследствие соударений свою кинетическую энергию и, когда она достаточно уменьшается, вступает во взаимодействие с каким-нибудь электроном.

Результат этой встречи оказывается гибельным для той и другой элементарной частицы. Удар! И только два разбегающихся в разные стороны фотона — вот все, что осталось после «катастрофы»:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma.$$

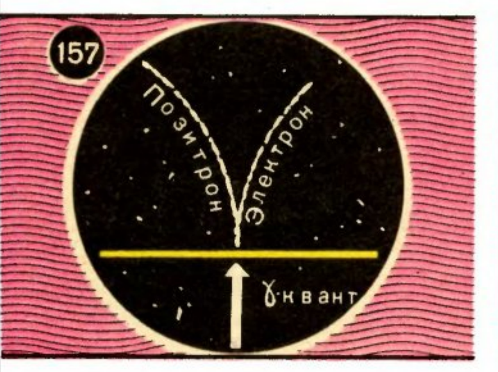
Но наблюдается и обратное явление — рождение пары электрон — позитрон при взаимодействии фотонов высоких энергий с веществом (рис. 157).

Взаимосвязь массы и энергии была предсказана еще Максвеллом в его электромагнитной теории света. Знаменитыми опытами русского физика П. Н. Лебедева эта теория была подтверждена. Давление света, измеренное им, совпало с предсказанным теорией Максвелла.

Математически взаимосвязь массы и энергии выражается формулой Эйнштейна:

$$E = mc^2.$$

При сообщении телу энергии увеличивается его масса. Старинный вопрос, не становится ли нагретое тело тяжелее (массивнее), получает, таким образом, положительный ответ. Конечно,





увеличение массы при этом ничтожно и никакие весы его подметить не смогут: 215 т воды при нагревании на 100° С получат прибавок к массе всего 1 мг. Точно так же увеличивается масса тела, приведенного в движение. Если в формулу Эйнштейна подставить выражение массы движущегося тела, данное выше, то получим:

$$E = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2 = m_0 c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Воспользуемся тем, что при $x << 1$ можно полагать: $(1 + x)^y = 1 + xy$. В нашем случае $x = -v^2/c^2$, $y = -{}^1/_2$. Отсюда находим, что

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{v^2}{2c^2} \cdot$$

Таким образом, энергия движущегося тела

$$E = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Прирост энергии движущегося тела обычно мы и оцениваем, называя его кинетической энергией:

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Как видно, эта энергия составляет весьма незначительное слагаемое; главное же количество энергии тела выражается слагаемым $m_0 c^2$ («энергия покоя»). При скорости тела 30 км/с (скорость Земли на ее орбите) первое слагаемое в 100 миллиардов раз больше второго.

Сделаем расчет для энергии покоя тела массой 1 г:

$$E = 0{,}001 \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 9 \cdot 10^{10} \text{ кВт} \cdot \text{с} = 25 \text{ млн. кВт} \cdot \text{ч}.$$

Впервые о наличии огромной энергии, таящейся в недрах вещества, люди узнали, когда было открыто явление радиоактивности. 1 г радия выделяет в 1 ч 0,00016 кВт·ч энергии. В урановой атомной бомбе или атомном реакторе 1 г урана при расщеплении выделяет $2 \cdot 10^4$ кВт·ч энергии.

Рассмотрим несколько подробнее на примере самопроизвольного распада радия (рис. 158), какие превращения энергии происходят при этом. Для обнаружения излучений радия некоторое количество его помещают на дне узкого углубления, сделанного в массивном куске свинца. Перпендикулярно к плоскости рисунка действует сильное магнитное поле (в направлении от наблюдателя). Над куском свинца на некотором расстоянии помещается фотопластинка. После некоторой экспозиции и проявления пластинки можно обнаружить три различные полоски. Полоса слева образовалась под действием α-лучей, крайняя справа — результат воздействия на пластинку β-лучей, средняя образовалась под действием γ-лучей, не отклоняемых магнитом. Тщательное исследование всех трех видов лучей показало, что α-лучи представляют собой ядра гелия, летящие со скоростью 20000 км/с. Они заряжены положительно и потому отклоняются магнитным полем влево.

Сильно отклоненные вправо β-лучи состоят из потока отрицательно заряженных электронов, а γ-лучи являются электромагнитным излучением очень короткой длины волны — 10^{-11} м. Внутренняя энергия ядра радия частично идет на сообщение кинетической энергии всем летящим частицам — продуктам рас-

пада, а также испускается в виде энергии излучения (энергии фотонов). Применяя известный теперь и в школе счетчик Гейгера, ученые подсчитали, что 1 г радия ежесекундно испускает $3{,}7\cdot10^{10}$ α-частиц, т. е. каждую секунду происходит распад $3{,}7\cdot10^{10}$ ядер радия.

Всякое радиоактивное вещество характеризуется периодом полураспада. У радия он равен 1 600 годам. Надо ждать 1 600 лет, чтобы любая взятая порция радия распалась наполовину. Еще через 1 600 лет произойдет распад половины оставшейся половины и т. д.

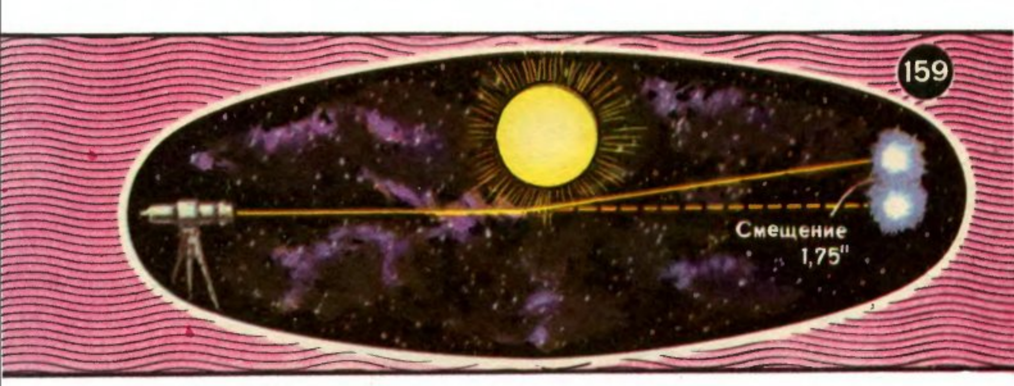
Некоторые радиоактивные вещества имеют очень короткую продолжительность жизни с периодом полураспада в доли секунды, для других он достигает миллиардов лет. Это зависит от продолжительности жизни ядер данного элемента.

Статистика продолжительности жизни атомных ядер напоминает статистические расчеты продолжительности жизни человека. Как в том, так и в другом случае учитывается ее среднее значение. Невозможно точно сказать, когда произойдет распад именно этого ядра радия. Это может случиться в следующую секунду, а может быть через год или через сотни и тысячи лет. Заметим, что в отличие от человека атомное ядро «не стареет». Это означает, что вероятность распада данного ядра не зависит от того, сколько времени это ядро уже «живет». Именно поэтому отдельные ядра могут «прожить» сколь угодно долго, чего, конечно, не скажешь о человеке.

Вернемся снова к квантам видимого света. Мы знаем теперь, что они обладают массой. Но понятие массы связывается не только с понятием инертности, но и с понятием тяготения. Поскольку инертная и гравитационная массы равны, то естественно предположить, что обладающие инертной массой фотоны должны обладать и «весом», т. е. на них должно действовать поле тяготения. Заметить это явление в земных условиях было бы чрезвычайно трудно вследствие малой силы притяжения. Но ведь при распространении света в мировом пространстве фотонам приходится пролетать и мимо гигантских солнц огромной массы. Не будет ли отклоняться луч света, проходя мимо таких солнц?

Проверка предположения о том, что лучи света, идущего от далекой звезды, отклоняются, когда свет проходит вблизи Солнца, представляет собой пример одного из наиболее драматичных эпизодов в истории физики. Еще Ньютон в своей «Оптике» ставил вопрос: «Не действуют ли тела на свет, не изгибают ли они своим действием его лучи?» В 1915 г. Эйнштейн предложил астрономам произвести проверку отклонения луча света от звезды, когда он проходит вблизи Солнца (рис. 159).

Но разве можно видеть звезды днем около Солнца? Да, во время полного солнечного затмения можно. Необходимо только, чтобы во время затмения около Солнца находились какие-нибудь яркие звезды. Ближайшим затмением, удовлетворявшим этому условию, было полное солнечное затмение 1919 г. Несмотря на крайне неблагоприятное время первой мировой войны, когда германские подводные лодки блокировали Англию, английское правительство субсидировало две научные экспедиции — одну на остров Принчипе в Гвинейском заливе у западных берегов Африки, другую в Бразилию (залив Собраль). Известный астроном и физик Эдингтон возглавил первую из этих групп. Задача экспедиции сводилась к тому, чтобы проверить, существует ли видимое смещение звезд в ближайшей области к Солнцу по сравнению с тем, когда они будут в наибольшем удалении от него на небе, скажем, ночью через полгода.



Но вдруг будет плохая погода? Тогда пропадут двухлетние труды по организации дорогостоящей экспедиции. Вот для того чтобы предохранить себя от подобной случайности, вторая группа под руководством Креммелина направилась в Собраль, чтобы под ясным небом Бразилии провести контрольные измерения. Приводим описание работы экспедиции Эдингтона по книге В. Львова «Альберт Эйнштейн» (Серия «Жизнь замечательных людей»).

«Полная фаза затмения на Принчипе продолжалась 302 с. Едва лишь диск Луны прикрыл Солнце и вспыхнул бледный венец короны, набежавшие облака окутали небо и, казалось, все обречено на неудачу. Сохраняя спокойствие, Эдингтон приказал наблюдателям выполнять установленный заранее план. В тишине, прерываемой стуком метронома, в удушливо влажной мгле внезапно опустившейся тропической ночи кипела напряженная работа. Перезаряжались кассеты с фотографическими пластинками, отсчитывались секунды, люди не смотрели вверх, людям

некогда было следить за волшебным небесным зрелищем. 16 фотографий было получено, и на первых снимках звезды не вышли совсем. На 14-й и 15-й сквозь разрывы в облаках проступило несколько звездных изображений. На 16-й, снятой перед самым концом, отчетливо получились отпечатки всех избранных для измерения звезд». Группа Креммелина на Собрале, пользуясь благоприятной погодой, также выполнила свою программу.

16 ноября 1919 г. собрались на объединенное заседание члены обоих королевских обществ — Британского и Лондонского астрономического. Председательствовал Дж. Дж. Томсон.

Результаты окончательной обработки данных, полученных обеими экспедициями, таковы:

В заливе Собраль	1,98″
На острове Принчипе	1,61″
Среднее из двух	1,79″

Предсказанное Эйнштейном значение составляло 1,75″.

ЧТО ТАКОЕ МэВ?

Один из самых крупных ускорителей элементарных частиц — синхрофазотрон Института физики высоких энергий около Серпухова — ускоряет протоны до энергии 70 млрд. эВ, или 7000 МэВ (МэВ — это миллион электронвольт). Много это или мало?

$$1\ \text{эВ} = 1{,}6\cdot 10^{-12}\ \text{эрг} = 1{,}6\cdot 10^{-19}\ \text{Дж};$$
$$7\ \text{млрд. эВ} = 0{,}11\ \text{эрг!}$$

Эрг очень мелкая единица энергии. 10 млн. эрг составляют 1 Дж. Моргнув глазом, вы производите работу в несколько эргов. Как же так?! Величайшая установка ядерной техники, позволяющая расщеплять атомы и производить исследования, имеющие огромное значение не только для современной, но и будущей науки и техники... и какие-то десятые доли эрга?! Давайте разберемся, в чем же тут дело.

Представьте себе шар, скатывающийся с наклонной плоскости. Пройдя наклонный участок пути равноускоренно под действием составляющей силы тяжести, он продолжает катиться по горизонтальному полу и сбивает расставленные на полу кегли. Импульс шара, которым он обладает, скатившись с горки, будет зависеть от высоты и от массы шара. Заряженная частица уско-

ряется в электрическом поле подобно нашему шару в поле тяготения. При этом разности высот, определяющей скорость шара, будет соответствовать разность потенциалов на участке пробега частицы, а массе шара — электрический заряд частицы. Поэтому эффективность удара частицы в мишень будет тем больше, чем больше разность потенциалов, которую пробежит частица, и чем больше заряд частицы. Вот почему единицей энергии, приобретаемой частицей, выбран электронвольт, т. е. энергия, какую получает электрон, разгоняемый электрическим полем, после пробега участка с разностью потенциалов 1 В.

Электронвольт — единица энергии, широко применяемая в атомной и ядерной физике. Ее распространенность объясняется просто. Действительно, если мы хотим сообщить элементарному заряду энергию E, то, для того чтобы определить необходимую для этого разность потенциалов, достаточно E разделить на e (заряд). С другой стороны, ведь удобство той или иной единицы меры зависит от масштаба измеряемых величин: в мире молекул для расчетов расстояний используют микрометры, в обыденной жизни обычны единицы метр и километр, а для межзвездных расстояний световой год (расстояние, которое свет преодолевает за год).

Единица энергии электронвольт удобна в атомной физике, особенно в тех случаях, когда речь идет об одной элементарной частице.

Работа выхода электрона из металла, работа ионизации газа слишком малы, чтобы их выражать в обычных механических единицах — эргах или джоулях. Разумеется, переходя к вопросам ядерной техники, мы столкнемся с энергиями, необходимыми для расщепления атомных ядер, и тогда придется увеличивать единицу энергии в тысячу, миллион и миллиард раз.

Энергии химических реакций, с которыми человек имел дело за весь предыдущий период его истории, не идут ни в какое сравнение с энергиями ядерных процессов. Открытие и применение огня явилось поворотным пунктом в истории цивилизации, а между тем сгорание углерода

$$C + O_2 = CO_2$$

сопровождается выделением 4,17 эВ энергии на одну молекулу. Взрыв гремучего газа приводит к образованию воды

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O,$$

при этом выделяется 3 эВ энергии на одну молекулу.

При химических реакциях ядра атомов остаются незатронутыми, изменения происходят только с электронами внешних оболочек («валентными электронами»). Картина резко меняется,

когда мы обратимся к ядерным реакциям. При синтезе ядра гелия из протонов освобождается 24 МэВ, т. е. в несколько миллионов раз больше, и все же это только небольшая доля энергии, скрытой в недрах вещества. Так называемый дефект массы, уменьшение массы вещества при образовании 1 моль гелия (4 г) соответствует энергии, которая выделилась бы при сжигании 5—6 вагонов лучшего каменного угля. Общее же количество энергии, соответствующее 1 г массы любого вещества, равно $5{,}6 \cdot 10^{26}$ МэВ.

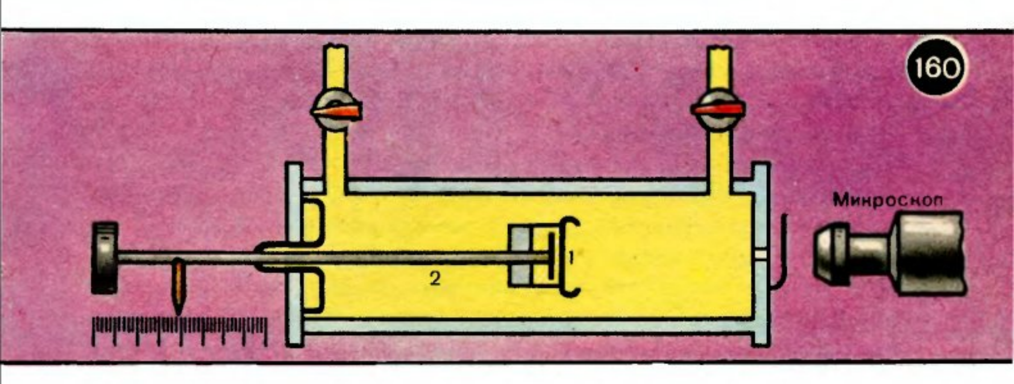
С ядерными реакциями человек вплотную столкнулся только тогда, когда Беккерель (1896) и супруги Кюри (1898) открыли явление радиоактивности. Первыми открытыми радиоактивными веществами были уран, радий, полоний и торий. Поражало непрерывное выделение энергии этими веществами. Вызываемые ими явления фосфоресценции и действия в темноте на фотографическую пластинку практически не ослабевали со временем, независимо от срока хранения. Очень скоро пришлось столкнуться с их сильным физиологическим действием. Беккерель положил в жилетный карман трубочку с радиоактивным порошком и продержал ее там в течение нескольких часов. После чего он получил болезненную язву, залечить которую удалось лишь через несколько месяцев. К счастью для человека, концентрация радия в земной коре крайне ничтожна.

Урановая смоляная обманка — минерал черного цвета, под действием атмосферных агентов приобретающий великолепную зеленую, желтую и красную окраску. Супругам Кюри пришлось провести гигантскую работу в течение трех с лишним лет, пока из нескольких тонн фабричных отбросов руды удалось, наконец, получить несколько миллиграммов хлорида радия. Вас, быть может, интересует, а что представляют собой чистые уран и радий? Это металлы серебристого цвета, но изменяющие окраску на воздухе: уран — в желтую, радий — в черную. Плотность урана 18,7 г/см^3, радия — около 6 г/см^3; уран плавится при температуре 1132 °С, радий — 700 °С. Масса добытого во всем мире радия до сих пор еще меньше одного килограмма. Цена радия, естественно, чрезвычайно высока.

Обращение с препаратами радия требует чрезвычайной осторожности: толстые свинцовые экраны должны защищать работающего. Мария Склодовская-Кюри — первая исследовательница ядерных превращений радия и первая жертва его смертоносных лучей. Она умерла в 1934 г. от белокровия. Уместно вспомнить слова Пьера Кюри при вручении ему и Марии Кюри Нобелевской премии в 1903 г.: «Нетрудно предвидеть, что в преступных руках радий может сделаться крайне опасным, и вот возникает вопрос: действительно ли полезно для человечества

знать секреты природы, действительно ли оно достаточно зрело для того, чтобы их правильно использовать, или это знание принесет ему только вред? Пример сделанного Нобелем открытия (изобретение динамита) является в этом отношении характерным. Мощные взрывчатые вещества позволили людям совершить замечательные деяния, и они же явились страшным средством разрушения в руках великих преступников, толкавших народы на путь войн... Я принадлежу к числу тех, кто верит, что новые открытия приносят человечеству больше пользы, чем вреда...»

Естественная радиоактивность, т. е. распад и превращение таких элементов, как уран, радий, в элементы с меньшей атомной массой, представляет собой процесс, протекающий помимо нашей воли. Ни ускорить, ни замедлить мы его не можем. Первое искусственное расщепление атомного ядра было осуществлено в 1919 г. Резерфордом. Схема этого опыта показана на рисун-



ке 160. На диск *1* нанесен тонкий слой радиоактивного вещества, являющегося источником α-лучей. Поток α-частиц направлялся на экран, покрытый сульфидом цинка. Подобно тому как это происходит в известном приборе — спинтарископе, каждая α-частица, ударяясь в экран, должна вызывать вспышку (сцинтилляцию), которую можно наблюдать в микроскоп. Однако если камера *2* наполнялась кислородом или углекислым газом, то при некотором расстоянии диска от экрана сцинтилляции не наблюдались, очевидно, α-частицы поглощались газом. Если камера наполнялась азотом, то, несмотря на то что отверстие перед экраном было закрыто серебряной пластинкой для поглощения наиболее быстрых α-частиц, сцинтилляции можно было отчетливо видеть. Резерфорд сделал отсюда вывод, что сцинтилляции вызывались частицами высоких энергий, возникшими при столкновении α-частиц с ядрами азота. Много раз повторенные опыты не оставили сомнения в том, что это были протоны (ядра водорода), возникшие при бомбардировке атомов азота α-части-

цами. Ядерная реакция, осуществленная Резерфордом, может быть записана в виде:

$$^{4}\mathrm{He}+{}^{14}\mathrm{N}\rightarrow{}^{17}\mathrm{O}+p,$$

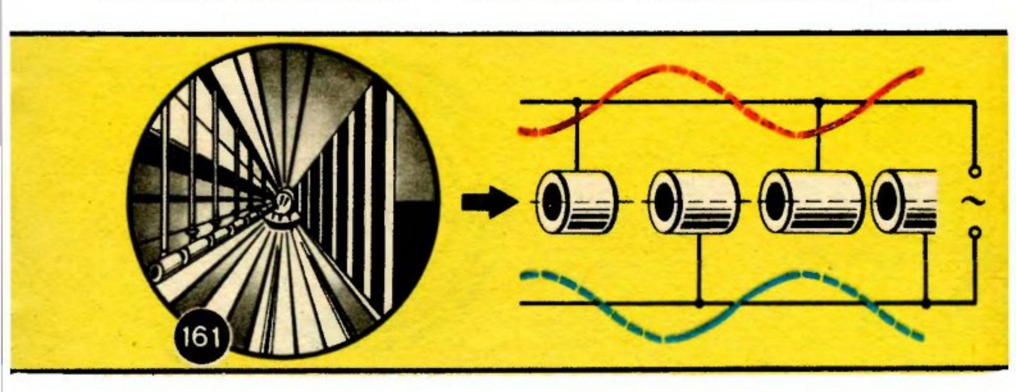
где ^{4}He — ядро гелия (α-частица); числа, стоящие около обозначений элементов,— это массовые числа (суммы чисел протонов и нейтронов в ядрах). В несколько другой установке Резерфорду удалось наблюдать ядерные превращения, в которых участвовали бор, фтор, натрий, алюминий и фосфор. С помощью α-частиц удавалось расщепить также магний, кремний, серу, хлор, аргон, калий. Однако не удавалось расщепить литий, углерод, кислород. Почему? Энергия α-частиц, использованных Резерфордом, была 7,7 МэВ. Если бы он применял частицы с энергией 18 МэВ, то ему, вероятно, удалось бы расщепить углерод и кислород. Что касается более тяжелых элементов, то мы знаем, что с увеличением порядкового номера элемента увеличивается положительный заряд ядра и, следовательно, силы отталкивания положительно заряженных α-частиц, отклоняющие их от мишени. Возникла идея искусственно ускорять «снаряды», применяемые для обстрела атомных ядер.

Простейшим ускорителем частиц является уже электровакуумная трубка, в которой электроны летят в электрическом поле. Какова энергия катодных лучей в электровакуумной трубке, напряжение между анодом и катодом которой равно, например, 30 000 В? Вы легко ответите на этот вопрос, если вспомните, что представляют собой катодные лучи и каково определение единицы энергии электронвольта. Соударяясь с встречающимися атомами, электроны могут передавать валентным электронам атомов энергию, достаточную для того, чтобы привести их в возбужденное состояние или полностью выбить из атома (вызвать ионизацию). Ударяя о твердую пластинку антикатода, катодные лучи вызывают рентгеновские лучи различной жесткости.

Однако для расщепления атомного ядра необходима большая энергия, энергия в несколько миллионов электронвольт. Для получения столь высоких энергий применяются специальные ускорители частиц. В линейных ускорителях (рис. 161) ускорение частиц вызывается высокочастотным переменным электрическим полем. Ускоритель состоит из ряда трубок постепенно увеличивающейся длины. Трубки по очереди соединены то с одним, то с другим полюсом источника переменного напряжения. Допустим, что ускорить надо положительную частицу — протон. С некоторой начальной скоростью частица попадает в первую трубку. Поля в трубках нет, и частица летит по инерции, сохраняя начальную скорость. В промежутке между трубками существует напряжение, так как обе трубки находятся под разным потен-

циалом. Поэтому в момент прохождения заряженной частицей электрического поля в промежутке между трубками она ускоряется. Далее частица проходит свой путь внутри второй трубки с постоянной, но теперь уже увеличенной скоростью. Если длина трубки рассчитана так, что при выходе из нее частицы прошло как раз полпериода переменного напряжения, приложенного к трубкам, то при переходе в следующую трубку частица снова ускоряется. При многократном повторении процесса удается получить частицы с энергией в несколько МэВ.

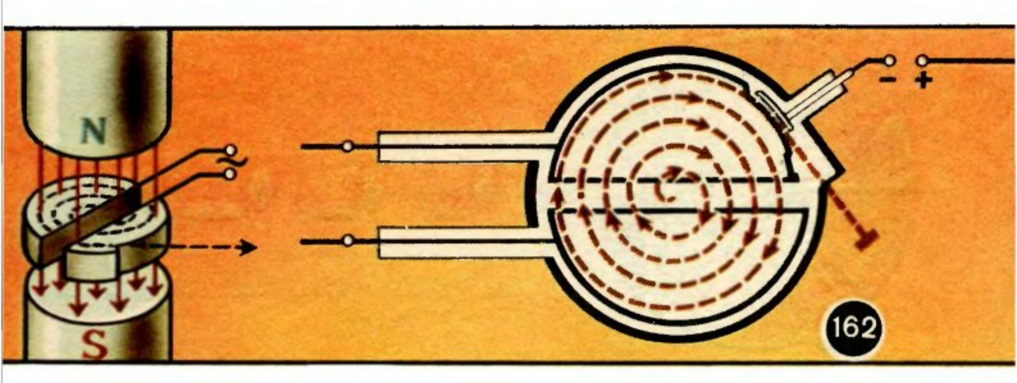
Существенным недостатком подобных линейных ускорителей является их чрезмерно большая длина. Так, например, ускоритель электронов в Станфорде (США) может разогнать электроны до 20 000 МэВ; его длина составляет 3,5 км! Можно, однако, заставить частицы двигаться не по прямой линии, а по спирали. Эта идея осуществлена в циклотроне, представляющем собой



один из типов циклических ускорителей. Что же может заставить заряженные частицы изменить их прямолинейное движение на круговое или спиральное? Это может сделать магнитное поле. Вспомните опыт Фарадея с вращением проводника с током в магнитном поле (беседа «Как создавалась картина электромагнитного поля»). Циклотрон состоит из большого электромагнита, между полюсами которого помещена ускорительная камера (рис. 162). Камера представляет собой огромную круглую металлическую «коробку», разделенную на две части. В центре камеры помещается источник заряженных частиц. Половинки камеры, называемые дуантами, присоединены к полюсам высокочастотного лампового генератора переменного напряжения. Таким образом, в зазоре между дуантами создается переменное электрическое поле. Частота электрического поля подбирается так, что за время движения частицы внутри дуанта по дуге окружности (искривление ее траектории происходит под действием магнитного поля) направление электрического поля меняется на проти-

воположное. Тогда, проходя между дуантами, частица каждый раз ускоряется. Процесс повторяется до тех пор, пока частица не достигнет нужной скорости. Далее она выводится на мишень. Внутри камеры ускорителя мощными насосами создается высокий вакуум во избежание торможения частиц молекулами газа. В приборах этого типа удается довести протоны, дейтроны (ядра тяжелого водорода) и α-частицы до энергии в несколько миллионов электронвольт. Но возможности ускорения частиц в циклотроне ограничены. Эти возможности ограничены не только размерами ускорительной камеры и магнитов. Основная трудность связана с физическим явлением, которое наблюдается при движении частиц со скоростью, близкой к скорости света.

С увеличением скорости растет масса частиц. Это приводит к увеличению периода полного оборота частицы, и она начинает попадать в зазор между дуантами не в нужные моменты време-



ни. Для тяжелых частиц это явление наблюдается позже, для легких раньше. Так, например, при напряжении электрического поля 100 000 В предельное значение энергии, которую циклотрон может сообщить протонам, составляет 20 МэВ, тогда как для электронов этот предел не превышает 1 МэВ. Поэтому циклотрон оказался непригоден для ускорения электронов.

Ускорители электронов, получившие название бетатронов (β-лучи, вы помните, это поток электронов), основаны на совсем другом принципе. В основу их расчета положены уравнения Максвелла, согласно которым вокруг изменяющегося магнитного поля возникает вихревое электрическое поле. Для получения изменяющегося магнитного поля электромагниты бетатрона, в отличие от электромагнитов циклотрона, питаются не постоянным, а переменным током с частотой порядка 10^2—10^3 Гц. Имеются бетатроны, ускоряющие электроны до 100 МэВ.

Советский физик В. И. Векслер предложил в 1945 г. идею устройства ускорителей, в которых по мере роста массы ускоря-

емых частиц изменяется и частота электромагнитного поля установки и, таким образом, частицы не выходят из режима ускорения. На этом принципе устроены современные усовершенствованные ускорители — синхротрон, фазотрон и синхрофазотрон. Не вдаваясь в теоретические и технические детали их устройства, приведем интересные данные, относящиеся к одному из крупнейших в мире ускорителей, установленному в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Этот ускоритель (синхрофазотрон) занимает отдельное здание. Гигантский магнит ускорителя, диаметр которого достигает почти 60 м, имеет массу 30 000 т. Для обслуживания этого электромагнита потребовалась постройка специального энергетического корпуса. Для создания и поддержания необходимого вакуума в ускорительной камере синхрофазотрона работают 56 мощных вакуумных насосов. Ускоряемые частицы, сделав в камере 4,5 млн. оборотов за 3 с, пробегают путь, в два раза превышающий расстояние от Земли до Луны.

Энергия протонов, ускоряемых в синхрофазотроне, достигает 10 000 МэВ.

КАК БЫЛ ОТКРЫТ НЕЙТРОН

Академик А. П. Александров вспоминает: «25 декабря 1946 года Игорем Васильевичем Курчатовым и его сотрудниками впервые в СССР была осуществлена самоподдерживающаяся ядерная цепная реакция... С этого момента из атомной науки начала рождаться могучая атомная промышленность Советской страны».

Человек научился получать потоки нейтронов, научился управлять ими, заставил нейтроны работать. Подвластные воле человека, нейтроны успешно трудятся на атомных электростанциях, дают жизнь сверхмощным двигателям атомных ледоколов. А ведь всего лишь пятьдесят с небольшим лет назад люди вообще не знали о существовании нейтронов.

Нейтрон был открыт в 1932 г. Открытие нейтрона — важнейшее событие в развитии современной физики.

Мысль о возможном существовании нейтрона была впервые высказана Резерфордом в 1920 г. Он представлял себе нейтрон в виде «нейтрального дублета» — тесного соединения протона и электрона. Было известно, что, например, атом гелия имеет два электрона и, следовательно, ядро этого атома должно иметь два протона (так как атом нейтрален). Однако масса атома гелия не в два, а в четыре раза больше массы атома водорода. В связи с этим возникла мысль, что ядро гелия составляют 4 протона и

2 электрона. С точки зрения Резерфорда, ядро гелия должно состоять из 2 протонов и 2 нейтральных дублетов.

Почему Резерфорд представлял нейтрон в виде дублета из протона и электрона, а не в виде самостоятельной нейтральной частицы? Это можно понять, если вспомнить, что в 20-е годы нашего столетия были известны только три элементарные частицы (электрон, протон, фотон), которые, как было принято тогда считать, полностью исчерпывают весь необходимый набор элементарных кирпичиков. Рассматривая нейтрон как объединение протона и электрона, Резерфорд тем самым следовал общепринятой концепции. Кроме того, открытая еще в 1898 г. β-радиоактивность ядер, как тогда казалось, вполне определенно указывала на наличие электронов внутри атомных ядер.

В 1924 г. де Бройль предложил сопоставлять с электроном некую волну (вспомним беседу «Понятие о зонной теории электропроводности»), и вскоре дифракция электронных волн была обнаружена на опыте. Длина волны электрона λ выражается через его импульс p по формуле де Бройля $\lambda = h/p$, где h — постоянная Планка. Чтобы электрон мог поместиться в атомном ядре, его длина волны должна, очевидно, не превышать диаметра ядра: $\lambda < d$ (d — диаметр ядра). С учетом формулы де Бройля перепишем это неравенство в виде: $p > h/d$. Зная размеры атомных ядер, можно оценить отсюда минимальный возможный импульс, а затем и энергию электрона внутри ядра. Оценки показывают, что электрон должен иметь в этом случае энергию не меньше 100 МэВ! Это слишком много. Это примерно в тысячу раз больше энергии, выделяющейся при β-распаде ядер. Однако если уменьшить энергию электрона до разумных значений, то существенно увеличится длина волны электрона и тогда электрон не «поместится» в ядре. Все это позволяло заключить, что, во-первых, электроны в состав атомных ядер не входят и, во-вторых, электрон при β-распаде ядра рождается в момент распада (подобно тому как рождаются фотоны при испускании света атомами).

В 1930 г. немецкие физики Боте и Беккер обнаружили, что бериллий при обстреле α-частицами испускает не протоны, а какое-то неизвестное излучение. Это излучение не оставляло следов в камере Вильсона; через довольно толстую свинцовую плиту (толщиной 10 см) оно проходило, почти не ослабевая. Было высказано предположение, что это есть очень жесткое γ-излучение, т. е. электромагнитное излучение, кванты которого обладают очень большой энергией. Загадочным излучением заинтересовались физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Они поставили на пути излучения заслонку из водородсодержащего вещества — парафина и получили интереснейший результат: легкая парафиновая заслонка, в отличие от тяжелой свинцовой,

надежно перекрывала излучение Боте—Беккера, при этом из парафина вылетали быстрые протоны в направлении излучения. И. и Ф. Жолио-Кюри предположили, что протоны — это ядра отдачи, возникающие в результате столкновения фотонов большой энергии с атомами водорода, имеющимися в парафине. Произведя необходимые оценки, они получили, что фотоны должны обладать очень большой энергией — около 50 МэВ.

Казалось бы, явление объяснено. Однако признать это объяснение удовлетворительным было нельзя. Многое оставалось неясным. Откуда берется столь большая энергия фотонов? Почему, передавая свою энергию протонам, фотоны в то же время «не желают» взаимодействовать с атомами свинца? И тем не менее в своей работе, опубликованной 18 января 1932 г., Ирен и Фредерик Жолио-Кюри продолжали считать излучение Боте—Беккера жестким электромагнитным излучением. Работа заканчивалась словами: «Итак, настоящими опытами, по-видимому, установлено, что электромагнитное излучение высокой частоты способно освобождать в водородсодержащих веществах протоны и придавать им высокие скорости».

Познакомившись с работой И. и Ф. Жолио-Кюри, английский физик Чедвик из лаборатории Резерфорда в Кембридже догадался, что французские физики имели дело не с электромагнитным излучением, а с нейтронами. Чедвик был учеником Резерфорда; под влиянием учителя он давно проникся идеей «нейтрона», искал нейтроны, ожидал встретить их в любом новом излучении. Впоследствии он признавался: «Мои мысли, естественно, вертелись вокруг нейтронов». Чедвик повторил опыты Жолио-Кюри, внеся в них существенное дополнение с целью проверки нейтронной гипотезы: он использовал разные заслонки, содержащие легкие элементы (водород, литий, углерод, азот и др.). Чедвик обнаружил, что загадочное излучение, возникающее при бомбардировке бериллия α-частицами, способно создавать не только протоны, но и другие ядра отдачи — ядра лития, углерода, азота и т. д.

Наиболее существенный момент в исследованиях Чедвика состоял в том, что он выполнил довольно тщательные измерения энергии ядер отдачи. Схема экспериментальной установки Чедвика показана на рисунке 163. Для измерения энергии ядер отдачи он воспользовался ионизационной камерой с усилителем и осциллографом. Ионизационная камера имеет два электрода, между которыми создана разность потенциалов порядка 1000 В. Ядро отдачи, пролетая вблизи этих электродов, производит ионизацию атомов газа, наполняющего камеру. Возникающие на пути ядра́ отдачи ионы и электроны движутся под действием электрического поля к соответствующим электродам. В резуль-

тате в цепи ионизационной камеры появляется импульс тока, который может быть усилен и подан на осциллограф. Измеряя интенсивность наблюдаемого на осциллографе импульса, Чедвик определил энергию различных ядер отдачи (протонов, ядер азота и др.). Сравнив затем энергии, он пришел к выводу: излучение, возникающее при бомбардировке бериллия α-частицами, есть не что иное, как поток нейтральных частиц с массой, практически равной массе протона.

И вот 27 февраля 1932 г. (всего через месяц после опубликования работы Жолио-Кюри) появляется краткое сообщение Чедвика под названием «Возможность существования нейтрона». В нем, в частности, говорилось: «Результаты, полученные мною, очень трудно объяснить, исходя из предположения об электромагнитном излучении, если при столкновении должны сохраняться энергия и количество движения. Однако трудности исчезают, если предположить, что излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, т. е. из нейтронов. Можно предположить, что в результате захвата α-частицы ядром ^{9}Be образуется ядро ^{12}C и испускается нейтрон... Столкновения этих нейтронов с атомами, через которые они проходят, создают атомы отдачи; наблюдаемая энергия атомов отдачи находится в полном соответствии с такой точкой зрения».

Расчеты, выполненные Чедвиком, довольно просты. Они основываются на использовании законов сохранения энергии и количества движения частиц. Предположим, что ядро массой m (пусть это будет масса предполагаемого нейтрона), имеющее скорость v, испытывает лобовое упругое столкновение с покоившимся ядром массы M. Закон сохранения энергии для данного случая имеет вид:

$$\frac{mv^2}{2}=\frac{mv_1^2}{2}+\frac{Mv_2^2}{2},$$

где v_1 и v_2 — скорости ядер массами m и M после столкновения. Закон сохранения количества движения можно записать в виде:

$$mv=mv_1+Mv_2$$

(конечно, скорости являются векторами, но в данном случае все эти векторы направлены вдоль одной прямой в одну сторону). Используя законы сохранения энергии и количества движения, находим скорость ядра отдачи:

$$v_2=v\frac{2m}{m+M}.$$

Предположим, что в одном случае ядро-мишень (оно же является и ядром отдачи) имеет массу M'; его скорость после столкнове-

ния v_2'. В другом случае ядро-мишень имеет массу M''; скорость после столкновения v_2''. Из предыдущего равенства находим:

$$v_2'/v_2''=(m+M'')/(m+M').$$

Например, для водородсодержащих и азотсодержащих мишеней $M'=1$, $M''=14$ (мы рассматриваем не собственно массы, а массовые числа):

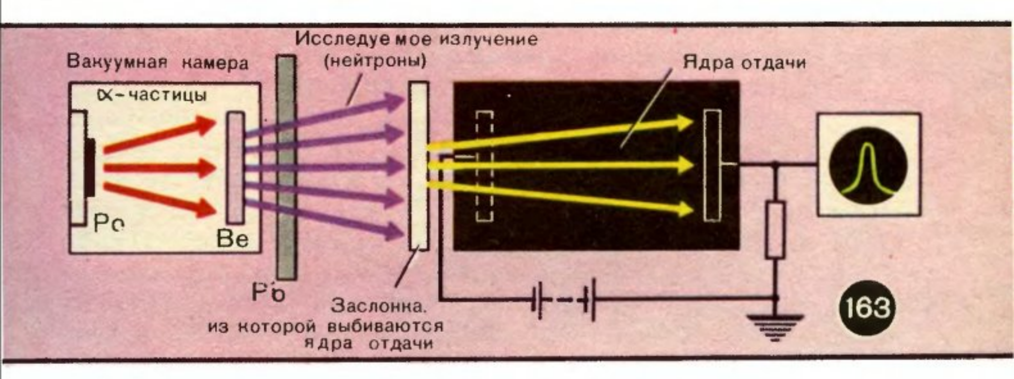
$$v_2'/v_2''=(m+14)/(m+1).$$

Измерив для этих мишеней энергии ядер отдачи, Чедвик нашел, что $v_2'/v_2''=7$. Таким образом,

$$(m+14)/(m+1)=7.$$

Отсюда он получил, что $m\approx 1$.

С принятием нейтронной точки зрения становилось понятно,



почему излучение из бериллия легко проходило через свинец и, наоборот, хорошо задерживалось заслонками из легких элементов. Из законов сохранения энергии и количества движения находим отношение энергии E_1 налетающей частицы, которую она имела после столкновения, к ее энергии E до столкновения:

$$\eta=\frac{E_1}{E}=\frac{v_1^2}{v^2}=\left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2.$$

Отсюда видно, что если $M\gg m$ (случай свинцовой заслонки), то $\eta\approx 1$, т. е. в каждом столкновении энергия налетающей частицы (нейтрона) уменьшается очень мало. Наоборот, если значение M близко к значению m, то отношение η становится малым, а это означает, что потери энергии нейтрона в каждом столкновении оказываются относительно большими. При лобовом столкновении с протоном нейтрон должен остановиться, передав сразу же всю кинетическую энергию протону. Теперь понятно,

почему нейтроны достаточно легко проходят сквозь свинец, но застревают в парафине, выбивая в направлении своего движения протоны.

Нет сомнений в том, что исследования, выполненные Боте—Беккером, а затем И. и Ф. Жолио-Кюри, сыграли большую роль в открытии нейтрона. Однако решающего шага эти исследователи все же не сделали. На этот счет очень образно выразился академик Б. М. Кедров: «Они подошли вплотную к двери, ведущей к разгадке новой тайны природы, они ощупали эту дверь и даже постучались в нее, но открыть ее не смогли, так как эта дверь открывается не «к себе» (то есть в сторону электромагнитной концепции), а «от себя» (то есть в сторону коренного отказа от этой концепции)». Здесь, наверное, надо пояснить, что электромагнитная концепция соответствовала принятой в те времена точке зрения на естественнонаучную картину мира, согласно которой материя состоит только из электронов, протонов и фотонов, а все взаимодействия в природе сводятся в конечном счете к гравитационным и электромагнитным.

Решающий шаг в открытии нейтрона сделал Чедвик. Он догадался проделать измерения, используя разные заслонки (водородсодержащую, азотсодержащую и др.), и тщательно измерил энергии ядер отдачи. Выполнив все это и сопоставив получившиеся количественные результаты, Чедвик сделал правильный вывод о существовании нейтрона. На примере этого открытия хорошо видно, какое важное значение имеют в физике количественные измерения. Открытие нейтрона — это не только появление еще одной элементарной частицы. Нейтрон привел к открытию совершенно нового типа взаимодействий — ядерного взаимодействия (его называют также сильным). Вскоре выяснилось, что, в отличие от электронов и протонов (а также фотонов), нейтроны нестабильны: свободный нейтрон самопроизвольно превращается в три частицы. В современной записи это превращение выглядит так:

$$n \longrightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e,$$

где p — протон, n — нейтрон, e^- — электрон, $\tilde{\nu}_e$ — электронное антинейтрино. Оказалось, что это превращение обусловлено специфическим взаимодействием, которое стали называть слабым. Так, наряду с гравитационным и электромагнитным, в физику вошли еще два типа взаимодействий — сильное и слабое.

Революционное значение открытия нейтрона состояло прежде всего в крушении электромагнитной концепции в физике. Стало ясно, что природа материи и ее превращения значительно богаче, чем это представлялось ранее, что они не сводятся только к электромагнитным явлениям.

Сразу же после открытия нейтрона советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик Гейзенберг выдвинули новую модель ядра атома. Согласно этой модели атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, между которыми на весьма малых расстояниях действуют мощные силы притяжения — ядерные силы. Благодаря этим силам нейтроны в ядре становятся стабильными. Правда, в некоторых ядрах эта стабильность нарушается, и тогда мы наблюдаем явление β-распада ядер. Протонно-нейтронная модель ядра оказалась свободной от всех неувязок и «натяжек» прежних моделей. Дальнейшие исследования подтвердили справедливость этой модели и, внеся в нее ряд уточнений, сделали ее общепринятой.

Другое направление исследований, обусловленных открытием нейтрона, связано с проблемой ядерных реакций. Ядерную реакцию под действием нейтронов впервые наблюдал английский физик Фезер в мае 1932 г. В современной записи эта реакция выглядит так:

$$n + {}^{14}\mathrm{N} \longrightarrow {}^{11}\mathrm{B} + {}^{4}\mathrm{He}.$$

Работа Фезера была первой ласточкой. Вслед за ней последовало большое число исследований по ядерным реакциям, вызываемым нейтронами. Стало зарождаться специальное направление в ядерной физике — нейтронная физика. Как отмечал Чедвик в своей лекции при получении Нобелевской премии по физике за открытие нейтрона, «большую эффективность нейтронов в получении ядерных реакций легко объяснить. При столкновении заряженной частицы с ядром вероятность ее проникновения в ядро ограничена кулоновской силой отталкивания. В случае же соударения нейтрона с ядром ограничений такого типа не существует. Сила взаимодействия нейтрона с ядром вначале весьма мала; лишь на очень малых расстояниях она начинает быстро расти и носит характер притяжения... Поэтому даже нейтроны очень малой энергии могут проникнуть в ядро».

В 1934 г. итальянским физиком Ферми была открыта искусственная радиоактивность атомных ядер под действием нейтронного облучения. В том же году Ферми с сотрудниками наблюдали деление ядер тяжелых элементов под действием медленных нейтронов (подробнее мы поговорим об этом в следующей беседе).

С открытием нейтрона начался новый период в развитии современной физики. В истории физики 1932 г. часто называют «годом чудес», отдавая должное обилию замечательных открытий, сделанных в течение этого года. С таким названием можно согласиться и в том случае, если учитывать только открытие нейтрона.

ПУСТЬ БУДЕТ АТОМ РАБОЧИМ, А НЕ СОЛДАТОМ!

В 8 часов утра 6 августа 1945 г. радарные установки в японском портовом городе Хиросиме обнаружили три приближавшихся к японским берегам самолета. В этом не было ничего необыкновенного, так как обескровленная военными неудачами японская авиация проявляла мало активности и американские самолеты почти беспрепятственно совершали разведывательные полеты над островами. Война проиграна, это было очевидно, Германия капитулировала еще в мае, квантунская армия разгромлена советскими войсками на полях Маньчжурии и Китая, вопрос о капитуляции Японии был вопросом ближайших дней. Поэтому появление американского бомбардировщика Б-29 не вызвало большого беспокойства у населения города. Трудовой день начинался в обычном порядке.

В 8 ч 14 мин Клод Изерли, летчик супербомбардировщика Б-29, радировал следовавшему за ним бомбардировщику, который вел полковник Тиббетс: «Бросайте!», и атомная бомба полетела на Хиросиму. Взрыв произошел в воздухе на высоте примерно 500 м от поверхности Земли. Сначала появился светящийся шар, расширившийся до диаметра 800 м. Через несколько секунд он взорвался и превратился в море огня, из которого поднялся белый столб дыма. Этот столб продолжал расти и, наконец, принял форму чудовищного гриба высотой 15—18 тыс. м. Через несколько секунд после взрыва в Хиросиме возник огненный шторм. Ветер дул со скоростью 64 км/ч, деревянные строения горели в районе радиусом 3 км, телефонные столбы оказались срезанными на уровне земли. В районе радиусом 800 м были разрушены все здания независимо от типа построек, а в радиусе от 1,6 до 2,6 км повреждения были настолько значительны, что ремонт оказывался невозможным. По оценке японских властей, из 75 тысяч домов, имевшихся в Хиросиме, полностью было разрушено 50 тысяч, а частично — 18 тысяч. Падающие здания и летящие обломки несли смерть и увечья тем, кто не погиб в море огня. «Мгновенные ожоги» (ожоги, вызванные световым излучением) сопровождались временной слепотой, делали кожу лица неузнаваемой («маска Хиросимы») и сопровождались даже обугливанием поверхности кожи.

К 1945 г. в Хиросиме насчитывалось около 300 тысяч жителей. По сведениям официальных учреждений Японии и США, в день взрыва погибло свыше 60 тысяч человек, ранено около 100 тысяч и тысячи пропали без вести. Военная цензура всеми способами препятствовала распространению истинных сведений о последствиях атомного взрыва. Мир лишь постепенно, с запоз-

данием в несколько лет, узнавал страшные подробности этого бесчеловечного акта. Вследствие паники и хаоса, царивших после взрыва, лишь немногие пострадавшие были отправлены в дальние больницы. Трамваи сжигали целиком, не освобождая от трупов. Мусор и нечистоты не убирались в течение трех месяцев. У оставшихся в живых наблюдались глубокие изменения в организме, и еще в настоящее время, через 40 лет после катастрофы, наблюдаются смертельные случаи проникающей радиации. Через три дня после Хиросимы была сброшена плутониевая бомба на Нагасаки с аналогичными результатами.

Атомные бомбы, сброшенные на Хиросиму и Нагасаки,— преступление, перед которым меркнут злодеяния величайших извергов прошлого. Летчик Клод Изерли был награжден медалью и получил чин майора. Когда он вернулся в родной Техас, его встретили как национального героя фанфарами, знаменами и цветами. Однако «герой» повел себя странно. Он отказался служить в авиации, отказался играть в фильме, в котором должен был изображать самого себя, отказался вообще работать. Часто по ночам он начинал метаться во сне и кричать нечеловеческим голосом: «Бросайте, бросайте же!» Потом: «Нет! Не сейчас! Подумайте о детях! Дети горят!..» В 1955 г. Клод Изерли совершил несколько краж и ограблений с единственной целью: «Я хочу, чтобы меня наказали»,— говорил он судьям. Наконец его поместили в психиатрическую больницу.

В городе Хиросиме воздвигнут памятник жертвам катастрофы. На нем надпись: «Спите спокойно, мы сделаем все для того, чтобы это больше не повторилось».

После окончания войны был проведен ряд испытательных взрывов у островов Бикини в воздухе и под водой. За создание урановой и плутониевой бомб последовало изобретение водородной бомбы, превышающей действие урановой бомбы больше чем в тысячу раз. Бомба, сброшенная на Хиросиму, по хвастливому заявлению тогдашнего президента США Трумэна, была равносильна 20 000 т тринитротолуола (взрывчатки). Что сказать о бомбах, эквивалентных 50 и 100 млн. т взрывчатки?

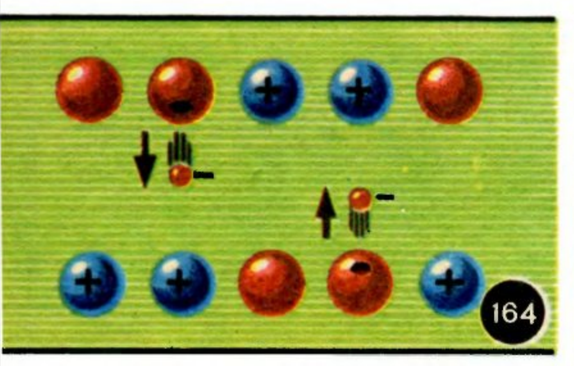
Советское правительство последовательно борется за всеобщее и полное разоружение и в первую очередь за запрещение проведения испытательных ядерных взрывов.

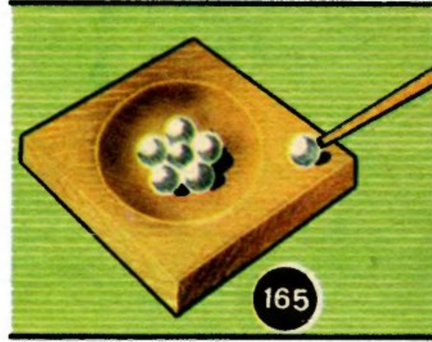
Откуда берется чудовищная энергия атомных бомб? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к физике атомной бомбы. Существуют два вида атомных бомб — урановые и водородные. Действие их основано на двух совершенно противоположных принципах: делении и синтезе атомного ядра.

Ядра атомов построены из положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов. Масса протона равна

$1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ кг, а масса нейтрона $1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ кг (речь идет, разумеется, о массе покоя частиц). Общее название протона и нейтрона нуклон (от латинского nucleus — ядро). Объединение протонов и нейтронов общим названием «нуклон» имеет, кроме всего прочего, объяснение во взаимной превращаемости этих частиц: протон может при некоторых условиях превращаться в нейтрон, и наоборот, нейтрон может превращаться в протон.

Обычным вопросом у людей, знакомящихся со строением ядра, бывает вопрос: как возможно совместное и притом тесное сосуществование в ядре протонов — частиц, заряженных одноименным положительным электричеством? Почему они не разлетаются, как, например, отталкивается положительно заряженный шарик от положительно заряженной стеклянной палочки? Силы, удерживающие нуклоны в ядре, называются ядерными силами. Имеется несколько попыток объяснить далеко еще и





сейчас не ясную природу ядерных сил. Советские физики И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко, а также немецкий физик Гейзенберг разработали теорию обменных сил. В этой теории предполагается, что между протонами (p) и нейтронами (n) в ядре происходит ряд последовательных взаимных превращений с образованием при этом новых элементарных частиц — π-мезонов или, как их часто называют, пионов:

$$n \longrightarrow p + \pi^-,$$
$$p \longrightarrow n + \pi^+$$

Как мячик в стремительной игре в теннис, летают пионы между двумя нуклонами поочередно от протона к нейтрону, и обратно (рис. 164). Законы квантовой механики приводят к заключению, что в таком случае должны возникать силы взаимного притяжения между нуклонами.

Большой интерес для понимания ядерных реакций представляет модель атомного ядра, получившая название «капельной

модели». Теория предложена и разработана американским физиком Гамовым, советским физиком Я. И. Френкелем и датским физиком Бором. Согласно этой теории ядро атома следует рассматривать как некую жидкую каплю, состоящую из протонов и нейтронов и обладающую своеобразным поверхностным натяжением. Вылет из ядра какой-нибудь из составляющих частиц аналогичен испарению жидкости. Но как для испарения жидкости необходимо молекулам сообщить энергию (например, нагреванием), так и выброс нуклона из ядра требует сообщения ему энергии извне. На рисунке 165 показана механическая модель, предложенная Бором. Внесенная энергия должна быть такой, чтобы какой-нибудь из шариков, находящихся в углублении, мог преодолеть «потенциальный барьер» и выскочить из лунки.

Если в качестве снарядов для расщепления ядра применяют положительно заряженные частицы, то приходится учитывать и отталкивающие силы, действующие на «снаряд» со стороны протонов ядра. В каждой точке электрического поля ядра имеется соответствующий электрический потенциал, который с приближением к ядру возрастает по закону обратной пропорциональности. Получается картина, аналогичная подъему шарика в гору, поверхность которой имеет форму гиперболоида (гипербола графически выражает закон обратной пропорциональности). Только шарикам, обладающим достаточной энергией, удается взобраться вверх и провалиться в «потенциальную яму», как в кратер вулкана. Шарик, не обладающий достаточной энергией, не достигает вершины и сворачивает с дороги или скатывается. Подобные искривленные следы положительных «снарядов» удается сфотографировать в известной камере Вильсона.

Обратимся к уже знакомому нам расщеплению ядра азота в опытах Резерфорда. Когда обладающий достаточной энергией «снаряд» (α-частица) попадает в ядро азота, он вызывает возмущение, и возникшее составное ядро оказывается в неустойчивом состоянии. Затем, выбрасывая («испаряя») протон, это ядро переходит в стабильное состояние:

$$^{4}\mathrm{He} + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow \text{составное ядро} \rightarrow {}^{17}\mathrm{O} + p.$$

Обычно промежуточную стадию составного ядра опускают и записывают реакцию в виде:

$$^{4}\mathrm{He} + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}\mathrm{O} + p.$$

В предыдущей беседе мы отмечали, что удобными «снарядами» для обстрела ядер являются нейтроны. Они не имеют заряда, потому свободно подходят вплотную к ядрам-мишеням.

При ядерных реакциях могут быть выброшены не только протоны, но и нейтроны. Тот или другой процесс приводит к пре-

вращению вещества, причем исходный элемент превращается в один из ближайших к нему в периодической таблице элементов. Испускание или поглощение нейтронов не изменяют химической природы элементов. Элемент-продукт обладает прежним числом валентных электронов, равным числу протонов, от этого и зависит химическая природа вещества. Изменяются в этом случае лишь число нейтронов и массовое число, а так как заряд ядра определяется числом протонов, то порядковый номер элемента остается прежним. Элементы, имеющие одинаковый порядковый номер, занимают в периодической системе одно и то же место и называются изотопами, что в переводе с греческого и означает «занимающие одинаковое место». У многих элементов есть радиоактивные изотопы.

В ядрах тяжелых элементов, например урана, содержится много протонов, взаимное отталкивание которых компенсирует-



ся сдерживающим действием ядерных сил. Попадание нейтрона в такое ядро может привести к «развалу», или, как называют, делению ядра. Воспользуемся опять капельной моделью ядра, чтобы лучше представить себе этот процесс (рис. 166). Разделение шарообразной капли на две половинки связано с увеличением общей поверхности, что требует затраты энергии. Если в ядро урана влетит нейтрон, то он внесет с собой необходимую энергию. При этом возбужденное ядро начнет пульсировать, как некая упругая капля. В какой-то момент оно примет вытянутую форму, затем образуется перехват, и отталкивающие силы положительно заряженных частиц разорвут ядро примерно на равные части, которые разлетятся в разные стороны. Кроме двух образовавшихся ядер-продуктов, при делении образуются два или три новых нейтрона, которые в свою очередь могут вызвать деление новых ядер. Количество нейтронов будет расти и расти, а вместе с тем все больше и больше ядер будет распадаться под их ударами. Это и есть цепная реакция, приводящая к взрыву атомной

бомбы. Зная дефект массы, по уравнению Эйнштейна можно подсчитать, какая при этом освобождается энергия. Оказывается, при делении одного ядра урана освобождается около 200 МэВ энергии. Но надо помнить, что 1 моль урана содержит $6{,}023 \cdot 10^{23}$ атома. Произведя простой расчет, вы получите, что 1 кг урана при делении выделяет $5{,}1 \cdot 10^{26}$ МэВ. (Такое количество теплоты получается при сжигании 2500 т угля.) Выделяясь за очень короткий промежуток времени, эта энергия вызывает повышение температуры продуктов взрыва до нескольких миллионов градусов. Стальная мачта, на которой была подвешена первая испытательная бомба в Нью-Мексико, мгновенно испарилась от этого жара. Взрыв такой бомбы эквивалентен взрыву десятков тысяч тонн тринитротолуола. Сверхмощная ударная волна производит не сравнимые с другими взрывами разрушения. На месте взрыва выпадают радиоактивные осадки.

Можно ли использовать колоссальные запасы энергии, выделяющиеся при делении ядер, не для разрушительных, а для мирных целей? Атомные электростанции (первая была пущена 7 июня 1954 г. в Советском Союзе), атомные реакторы, атомные ледоколы, атомные подводные лодки свидетельствуют о том, что техника в настоящее время обладает средствами управления цепной реакцией. Для получения управляемой реакции применяют искусственное замедление и поглощение нейтронов различными замедлителями и поглотителями.

Дело в том, что используемый для ядерных реакций уран состоит из изотопов ^{238}U и ^{235}U. Первый в реакции не участвует, но обладает способностью поглощать быстрые нейтроны. Чтобы «уберечь» эти нейтроны для бомбардировки ^{235}U, их замедляют. Однако слишком большое число медленных нейтронов в реакторе может привести к чрезмерно бурной цепной реакции — к взрыву. Поэтому используют специальные поглотители нейтронов.

Для замедления нейтронов особенно пригодны легкие вещества. Из механики мы знаем, что если шар малой массы упруго ударяет в шар гораздо большей массы, то происходит отражение малого шара почти без потери энергии. Напротив, если движущийся малый шар упруго ударит в неподвижный шар равной ему массы, то он отдаст этому шару всю свою энергию, а сам остановится. Точно так же и нейтрон при соударении с протоном, масса которого почти равна массе нейтрона, потеряет максимум своей энергии, передав ее ядру атома водорода. Об этом уже шла речь в предыдущей беседе. Правда, газообразный водород практически мало пригоден, чтобы служить замедлителем. Обычно в качестве замедлителя применяется тяжелая вода (соединение тяжелого водорода с кислородом) или графит. Регулирова-

ние работы атомного реактора (рис. 167) осуществляется при помощи мощных поглотителей медленных нейтронов в виде подвижных кадмиевых стержней *2*, вдвигаемых в нужный момент в блок графитового реактора *3*, внутри которого находится уран *1*. Поскольку радиоактивные излучения чрезвычайно опасны, реактор окружен толстыми бетонными стенами *4*, а управление производится дистанционно, с находящегося в отдельном помещении пульта управления.

Для охлаждения реактора применяются вода или легкоплавкие металлы. Жидкий охладитель нагревается в реакторе до 250—300°С и затем отводится в парообразователь *5*, откуда пар поступает в турбины турбогенераторов *6*. В конечном счете мы получаем электрическую энергию, которая и используется обычным способом.

Кратко расскажем о втором возможном процессе освобождения внутриядерной энергии. Речь идет о синтезе ядер легких элементов в термоядерных реакциях. Пока этот колоссальный источник энергии применяется лишь в качестве средства разрушения невиданной силы в виде водородной бомбы. Описание реакции синтеза гелия из водорода было дано раньше в беседе «$E=mc^2$», мы не будем его повторять.

Почему ядерные реакции наблюдаются только с наиболее легкими элементами — водородом, гелием, или, наоборот, с самыми тяжелыми — ураном, плутонием, торием? Почему легкие элементы выделяют энергию в реакциях синтеза, а тяжелые — в реакциях деления и расщепления? Можно ли надеяться использовать внутреннюю энергию средних элементов периодической таблицы? Нельзя ли, например, высвободить энергию связи, таящуюся в куске железного лома, ведь такого ядерного горючего, как уран, неизмеримо меньше, чем запасов железа?

Взгляните на диаграмму (рис. 168), показывающую зависимость энергии связи от массового числа элемента. Но прежде, что такое энергия связи? Энергией связи называется энергия, соответствующая дефекту массы при образовании ядра какого-нибудь элемента из составляющих его нуклонов. Масса ядра атома всегда меньше суммарной массы составляющих его протонов и нейтронов.

Например, ядро гелия состоит, как известно, из двух протонов и двух нейтронов. Подсчитаем сумму их масс (в атомных единицах массы):

$$\underbrace{2\cdot 1,0076}_{\text{протоны}}+\underbrace{2\cdot 1,0089}_{\text{нейтроны}}=\underbrace{4,033}_{\text{сумма}}.$$

Масса ядра гелия, весьма точно измеренная, равна 4,003. Поэтому при образовании ядра гелия освобождается энергия, соответ-

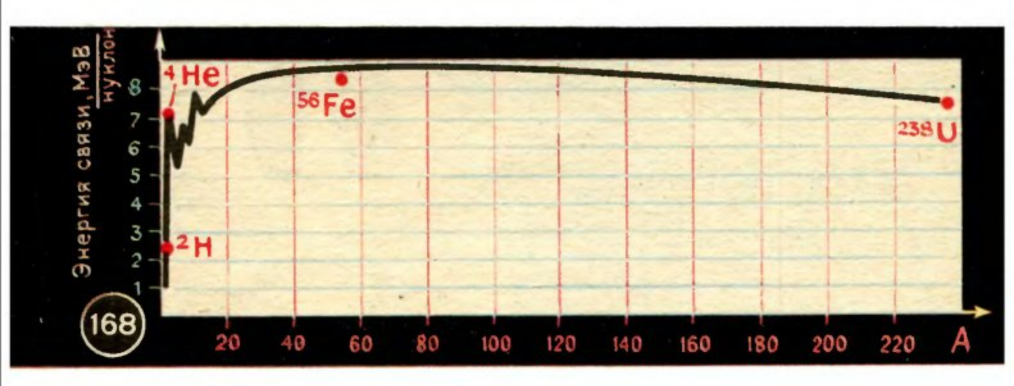

Курчатов Игорь Васильевич
(1903-1960)
ЛЕНИН
1
2
3
4
5
6

ствующая дефекту массы при таком синтезе:

$$E = mc^2 = 28 \text{ МэВ}.$$

В диаграмме по вертикальной оси откладывается энергия связи в расчете на один нуклон. Для гелия эта средняя энергия равна 7 МэВ.

По горизонтали на диаграмме отложены массовые числа. Из рассмотрения левой части этой диаграммы становится понятно, что ядра атомов со средними массовыми числами более устойчивы, чем легкие ядра, поскольку они характеризуются большей энергией связи. Переход к средним ядрам от легких возможен путем синтеза. Наоборот, в правой падающей ветви кривой переход к более устойчивым ядрам происходит в направлении влево, в сторону меньших массовых частиц, т. е. в процессе деления тяжелых ядер. В средней части диаграммы размещены наиболее



устойчивые элементы с максимальной энергией связи; наиболее устойчивым элементом среди известных в периодической системе является железо с массовым числом 56. Чтобы ответить на вопрос, почему легкие элементы выделяют энергию в реакциях синтеза, а тяжелые в реакциях деления, сделаем еще два подсчета для того и другого случая.

Синтез гелия. Полная энергия связи ядра гелия 28 МэВ. Допустим, происходит синтез этого ядра из двух ядер дейтерия (тяжелого водорода). По диаграмме ядро дейтерия, состоящее из одного протона и одного нейтрона, имеет энергию связи 2,18 МэВ. Энергия связи для двух ядер дейтерия равна 4,36 МэВ. Следовательно, при синтезе гелия освобождается 23,64 МэВ энергии.

Деление урана-235. Полная энергия связи ядра урана-235, содержащего 235 нуклонов, равна 1786 МэВ. При делении ядро урана распадается на два примерно одинаковых осколка. Будем считать, что эти осколки совершенно одинаковы и каждый со-

держит 117 нуклонов. Энергию связи их найдем в средней части диаграммы по соответствующим массовым числам. Эта энергия равна 8,6 МэВ. Сумма энергий связи осколков 2·117·8,6 МэВ= =2012 МэВ.

При делении, следовательно, освобождается энергия, равная 226 МэВ.

Может показаться, что при делении урана выделяется больше энергии, чем при синтезе гелия, но ведь расчет был проведен для одного атома того и другого элемента. Если же произвести расчет для равных количеств урана и гелия, скажем, для одного килограмма, то мы увидим, что при реакции синтеза гелия освобождается энергии в 10 раз больше, чем при делении урана.

Реакции синтеза протекают только при температурах порядка десятков и сотен миллионов градусов. В водородной бомбе для создания такой высокой температуры служит взрыв включенной в нее урановой бомбы.

Но как создать температуры в миллионы градусов не в бомбе, а в экспериментальных и технических установках? Это достигается пропусканием через разреженный газ электрического тока в сотни тысяч ампер. Такая большая сила тока получается при разряде батарей мощных конденсаторов. Во время разряда температура газа становится очень высокой, а газ — полностью ионизованным, т. е. атомы теряют все свои электроны. Вещество в таком состоянии носит название плазмы. Но какой же материал может выдержать температуру в несколько миллионов градусов? Трудная задача стала перед учеными: как изолировать высокотемпературную плазму от стенок камеры? Ученые предложили использовать для изоляции плазмы сильное магнитное поле. Заряженные частицы (ядра водорода) не могут свободно двигаться поперек линий магнитной индукции, магнитное поле искривляет их траектории и заставляет возвращаться назад. Вследствие ограничения, накладываемого сильным магнитным полем на движение заряженных частиц, такое поле играет роль «прослойки», удерживающей плазму от контакта со стенками камеры.

В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова имеются экспериментальные установки разных конструкций: в форме пустотелого тороида (труба, согнутая кольцом) и в форме прямого цилиндра. Нет сомнения, что трудная задача управления термоядерной реакцией синтеза легких элементов будет успешно решена нашими учеными. О том, что сулит народному хозяйству успешное решение этих проблем, можно судить хотя бы по следующему отрывку из одной статьи академика И. Е. Тамма: «Из дейтерия, содержащегося в 1 л воды, можно получить столько же энергии, сколько из 350 л бензина. Таким образом,

с энергетической точки зрения четыре земных океана равноценны 1440 океанам бензина. Даже при стократном увеличении потребления энергии такого запаса хватит человечеству на миллиарды лет».

Отметим, что в термоядерных процессах не выделяется никаких вредных радиоактивных отходов. Это замечание не относится к водородным бомбам, которые представляют собой сочетание с атомной урановой бомбой. Испытательные взрывы этих бомб засоряют и отравляют атмосферу радиоактивной пылью. Советское правительство неуклонно добивается полного запрещения ядерных испытаний во всех их видах. Ужасы Хиросимы не должны повториться!

Пусть будет атом
Рабочим, а не солдатом!

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Эта история берет свое начало в 90-х годах прошлого столетия, когда был открыт электрон. И вплоть до 1932 г. она развивалась сравнительно медленно. Тогда ничто, пожалуй, не предвещало тех бурных и подчас драматических событий, которым суждено было произойти впоследствии. В те не столь уж далекие времена физикам вполне было достаточно всего трех элементарных частиц — электрона, протона, фотона (e , p, γ).

1932 год — знаменитый «год чудес». Сначала появляется сообщение Чедвика об открытии нейтрона (n). Затем Андерсон, используя камеру Вильсона, обнаруживает в космическом излучении позитрон (e^+) — античастицу по отношению к электрону. В том же году развертываются исследования свойств нейтрона и прежде всего его нестабильности. Физики приходят к выводу, что свободный нейтрон превращается не в две частицы (протон и электрон), а в три (протон, электрон и некая новая частица, которой Ферми дал название «нейтрино»). В 1933 г. Паули теоретически обосновал основные свойства нейтрино (ν). Прямое экспериментальное подтверждение существования этой частицы было дано много позднее — в 1953 г. (в опытах Райнеса и Коуэна).

С 1932 г. началось достаточно бурное развитие физики элементарных частиц. Теперь уже стало ясно, что мир нельзя «уместить» в рамки электромагнитной модели, что наряду с электромагнитными и гравитационными в природе существуют еще два фундаментальных типа взаимодействий — ядерные

(сильные) и слабые. Всего лишь две новые частицы (нейтрон и позитрон) разрушили существовавшую ранее гармонию, показали ее ложность. Оказывается, исключение было принято за правило: тот факт, что электроны и протоны стабильны и самопроизвольно не превращаются в другие частицы,— это одно из очень немногих исключений в мире элементарных частиц (кроме них, стабильны еще только фотон и нейтрино). Правилом в этом мире являются именно взаимопревращения частиц — как самопроизвольные, так и происходящие при взаимных столкновениях частиц. Впрочем, в этом физикам еще предстояло убедиться.

После того как в 1932 г. была выдвинута протонно-нейтронная модель атомного ядра (Д. Д. Иваненко, Гейзенберг), на первый план выступила проблема физического объяснения ядерных сил, связывающих протоны и нейтроны в ядре. В 1935 г. Юкава предложил гипотезу, согласно которой эти силы возникают в результате происходящего между нуклонами обмена некими частицами. Юкава оценил возможную массу этих частиц, она оказалась равной примерно 200—300 массам электрона. В 1936 г. Андерсон обнаруживает в космическом излучении новую частицу, ее масса равна 207 m (здесь и далее m — масса электрона). Частица получила название «мю-мезон»; впоследствии ее стали называть мюоном (μ^-; античастица μ^+). Естественно, что мюон вначале считали той самой частицей, которая, согласно гипотезе Юкавы, должна являться переносчиком ядерного взаимодействия. Однако вскоре выяснилось, что на эту роль мюон не годится: он очень слабо взаимодействует с веществом. Надо признать, что и по сей день физики так и не знают, какую роль в природе играет мюон. Они часто называют его «тяжелым электроном», потому что он действительно сходен с электроном — за исключением того, что в 200 раз тяжелее и, разумеется, нестабилен: мюон «живет» всего лишь 10^{-6} с, после чего превращается в обычный электрон, нейтрино и антинейтрино. Исследования свойств мюона обнаружили, что в природе существуют не одно, а два различных нейтрино (и соответственно два антинейтрино); одно из них стали называть электронным (ν_e), а другое мюонным (ν_μ). Кстати, мюон распадается на электрон, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино. Экспериментальное доказательство существования двух типов нейтрино было получено в 1962 г. в опытах на ускорителе в Брукхейвене (США).

А что же с частицами, которые предсказывал Юкава? Эти частицы были обнаружены в космическом излучении в 1947 г. Пауэллом; затем они были получены в 1948 г. на ускорителе в Беркли (США). Указанные частицы называют пи-мезонами или,

короче, пионами (π^+; античастица π^-). В 1950 г. был открыт нейтральный пион (π^0), который, как оказалось, подобно фотону не имеет античастицы. Можно сказать, что нейтральный пион и фотон тождественны со своими античастицами. Масса заряженного пиона составляет 273 m, а нейтрального 264 m. Заряженный пион распадается за время порядка 10^{-8} с ($\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$), тогда как для распада нейтрального пиона требуется существенно меньшее время — 10^{-16} с ($\pi^0 \to \gamma + \gamma$, или $\pi^0 \to \gamma + e^- + e^+$).

В начале 50-х годов была открыта целая группа новых частиц со сходными свойствами. Они рождались па́рами при столкновениях нуклонов с пионами; эти процессы были обусловлены сильным взаимодействием и поэтому протекали очень быстро — за время порядка 10^{-22} с. Погибали (распадались) новые частицы, естественно, поодиночке, но относительно медленно — за время 10^{-8}— 10^{-10} с (за счет слабых взаимодействий). Физики находили все это весьма странным, так как каждая из новых частиц распадалась на сильно взаимодействующие частицы (например, нуклоны и пионы), среди продуктов распада не было ни электронов, ни мюонов, ни нейтрино. Поэтому было непонятно, что же мешает новым частицам распадаться за существенно более короткое время. Было также непонятно, почему они рождаются па́рами. По этим причинам физики стали называть новые частицы странными. Заметим, что термин «странные частицы» прижился и теперь употребляется в физике как научный. К странным частицам относят каоны (заряженный каон K^+ с его античастицей K^- и нейтральный каон K^0 с его античастицей $\tilde{K}^0$), имеющие массу около 970 m, а также группу частиц тяжелее нуклонов, объединяемую под названием «гипероны»: ламбда-гиперон (Λ^0, его масса составляет 2180 m), три сигма-гиперона (Σ^+, Σ^0, Σ^-, массы 2330—2340 m), два кси-гиперона (Ξ^+ и Ξ^-, масса около 2580 m), омега-гиперон (Ω^-, масса 3270 m). У каждого гиперона есть своя античастица.

Приведем примеры реакций рождения странных частиц:

$$\pi^- + p \longrightarrow K^0 + \Lambda;$$
$$\pi^- + p \longrightarrow K^+ + \Sigma^-;$$
$$\pi^+ + p \longrightarrow K^+ + \Sigma^+.$$

Мы видим, что здесь всякий раз гиперон рождается в паре с каоном. Выяснилось, что странные частицы рождаются не только па́рами, но и в большем количестве (на один гиперон могут приходиться два каона):

$$p + p \longrightarrow p + K^0 + K^+ + \Xi^0;$$
$$p + K^- \longrightarrow K^0 + K^+ + \Omega^-.$$

А вот примеры распадов странных частиц:

$$K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^0;$$
$$\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^-;$$
$$\Lambda^0 \longrightarrow n + \pi^0;$$
$$\Sigma^+ \longrightarrow p + \pi^0;$$
$$\Sigma^+ \longrightarrow n + \pi^+.$$

Чтобы объяснить загадки поведения странных частиц, надо принять во внимание, что чрезмерно большое (по масштабам времени в микромире) время жизни частицы всегда связано с каким-нибудь законом сохранения или даже с несколькими законами сохранения. Предположим, что частица характеризуется некоторой сохраняющейся величиной; ясно, что эта частица может прекратить свое существование лишь при условии передачи рассматриваемой величины каким-то другим частицам. Возьмем простой и понятный всем пример: электрон обладает электрическим зарядом и при распаде (если таковой совершится) должен кому-то передать этот электрический заряд, иначе нарушится закон сохранения электрического заряда. Но вследствие законов сохранения энергии и количества движения электрон может распасться лишь на такие частицы, у которых суммарная масса покоя меньше массы покоя электрона. Это могут быть только фотоны и нейтрино. Однако у этих частиц нет и принципиально не может быть электрического заряда (в соответствии с требованиями теории относительности). Получается, что электрону некому передать свой электрический заряд, поэтому он и «вынужден» жить бесконечно долго. Таким образом, стабильность электрона оказывается следствием законов сохранения электрического заряда, энергии и количества движения.

Но вернемся к странным частицам. Чтобы объяснить их удивительную «долгоживучесть», физики ввели в рассмотрение специальную физическую величину, назвав ее «странностью», и при этом стали считать, что она сохраняется в сильных взаимодействиях и не сохраняется в слабых. Странность, приписываемая различным частицам (рассматриваются только частицы, участвующие в сильных взаимодействиях; следовательно, электрон, мюон и нейтрино надо исключить), показана в таблице:

Странность	+3	+2	+1	0	−1	−2	−3
частицы			$K^+ K^0$	$\pi^+ p n$	$\Lambda^0 \Sigma^+ \Sigma^0 \Sigma^-$	$\Xi^- \Xi^0$	Ω^-
античастицы	$\tilde{\Omega}^-$	$\tilde{\Xi}^- \tilde{\Xi}^0$	$\Lambda^0 \tilde{\Sigma}^+ \tilde{\Sigma}^0 \tilde{\Sigma}^-$	$\pi^- \tilde{p} \tilde{n}$	$K^- \tilde{K}^0$		

Заметим, что странность выражается безразмерным целым числом; при переходе от частицы к античастице странность меняет знак.

Реакции рождения странных частиц идут через сильные взаимодействия; при этом странность должна сохраняться. Так оно и есть. Возьмем, например, реакцию: $p+K^{-}\longrightarrow K^{0}+K^{+}+\Omega^{-}$. Используя приведенную выше таблицу, получаем для суммарной странности исходных частиц: $0+(-1)=-1$. Для продуктов реакции находим: $1+1+(-3)=-1$. Мы убеждаемся, что закон сохранения странности в данном случае действительно выполняется. В то же время все реакции распада для странных частиц идут без сохранения странности, но зато они происходят относительно медленно (через слабые взаимодействия). Быстрый распад странных частиц невозможен, поскольку при этом им некуда «девать» свою странность.

А если бы тяжелая частица типа гиперона (или типа каона) не обладала странностью? Могла бы такая частица распасться очень быстро — за счет сильных взаимодействий? Да, могла бы, если ей не будут «мешать» в этом другие законы сохранения (как это, например, имеет место для нуклонов). В конце 50-х и в начале 60-х годов было открыто довольно много таких частиц. Все они жили всего лишь $10^{-22}-10^{-23}$ с и распадались через сильные взаимодействия; их назвали «резонансами». Общее число обнаруженных резонансов к 1980 г. превысило 300!

Остановимся мысленно на 1964 г. и попробуем подытожить в общих чертах наши знания об элементарных частицах, накопленные к этому времени.

1. Существуют три типа взаимодействий (не считая гравитационного): сильное, электромагнитное, слабое. Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в атомных ядрах, электромагнитное связывает электроны в атомах и атомы в молекулах, слабое ответственно за медленные распады частиц. Время жизни частиц, распадающихся через слабое взаимодействие, не меньше 10^{-10} с, тогда как для частиц, распадающихся через электромагнитное взаимодействие (например, для нейтрального пиона), оно составляет примерно 10^{-16} с, а через сильное взаимодействие — $10^{-22}-10^{-23}$ с.

2. Все элементарные частицы подразделяются на три группы:

а) фотоны;

б) лептоны (в 1964 г. были известны четыре лептона: электрон, мюон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино);

в) адроны, которые, в свою очередь, подразделяются на мезоны (пионы и каоны) и барионы (нуклоны и гипероны). Среди мезонов и барионов имеется также большое число частиц, относящихся к резонансам.

Важно подчеркнуть, что лептоны не участвуют в сильном взаимодействии (это можно рассматривать как определение лептона).

3. Почти все частицы (кроме фотона, нейтрального пиона и некоторых других) имеют свои античастицы. Масса античастицы строго равна массе соответствующей частицы. Различные заряды частицы и античастицы (электрический, странность и др.) имеют противоположные знаки.

Таковы основные знания о частицах, накопленные к 1964 г. Больше всего физиков смущало сильное несоответствие между малым числом лептонов и слишком огромным (если учитывать также резонансы) числом адронов. Вполне естественно было предположить, что адроны представляют собой составные частицы, являются структурными образованиями из каких-то немногих микрообъектов. И вот в 1964 г. Гелл-Ман и независимо от него Цвейг выдвигают и обосновывают эту гипотезу. Для новых микрообъектов было предложено название «кварки», имеющее случайное (чисто литературное) происхождение. Были постулированы три кварка (u, d, s) и три антикварка ($\tilde{u}$, $\tilde{d}$, $\tilde{s}$). Электрический заряд, выраженный в единицах заряда электрона, а также странность этих микрообъектов приведены в таблице:

	кварки			антикварки		
	u	d	s	$\tilde{u}$	$\tilde{d}$	$\tilde{s}$
Электрический заряд	+2/3	−1/3	−1/3	−2/3	+1/3	+1/3
Странность	0	0	−1	0	0	+1

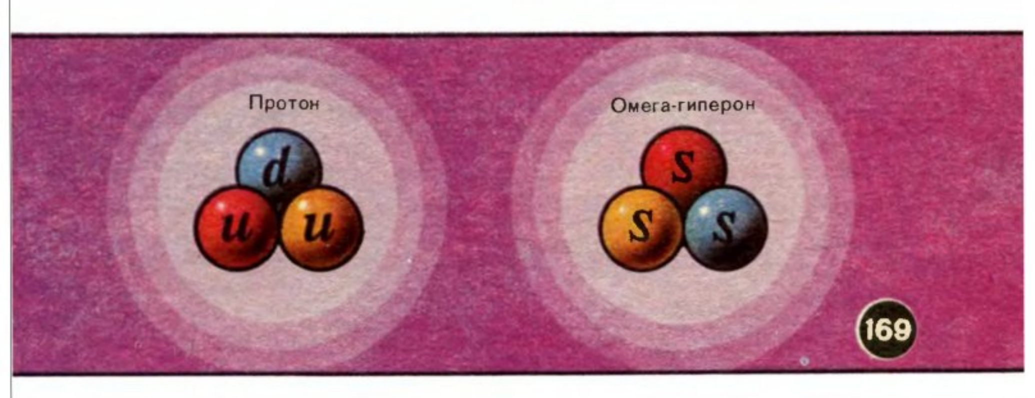
Обратите внимание: у кварка дробный электрический заряд, кратный или равный одной трети заряда электрона!

Правило построения адронов из кварков таково: барион состоит из трех кварков, антибарион — из трех антикварков, мезон или антимезон состоит из двух микрообъектов: кварка и антикварка. Надо подчеркнуть, что кварковая структура предложена только для адронов (т. е. для мезонов и барионов), но не для лептонов. Поэтому особенно неудачным представляется давно уже устаревшее название мю-мезон, применяемое для мюона. Мюон является лептоном и никакого отношения к мезонам (а следовательно, к адронам) не имеет.

Пользуясь указанным выше правилом и используя таблицу для кварков и для странности адронов, совсем нетрудно составить кварковые структуры для различных адронов:

π^+	π^-	K^0	$\tilde{K}^0$	K^+	K^-	p	n	Λ^0	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Ξ''	Ξ	Ω^-
$u\tilde{d}$	$\tilde{u}d$	$d\tilde{s}$	$\tilde{d}s$	$u\tilde{s}$	$\tilde{u}s$	uud	udd	uds	uus	uds	dds	uss	dss	sss

Согласно современным представлениям, каждый кварк (антикварк) существует в трех разновидностях, называемых условно цветом. Так, есть красный *s*-кварк, желтый *s*-кварк, синий *s*-кварк. Разумеется, понятию цвета кварка не надо придавать буквального смысла. Существенно, что в состав любого бариона входят кварки разных цветов (рис. 169). Используя цветовую терминологию, можно сказать, что в каждом барионе перемешаны три основных цвета и поэтому барионы могут рассматривать-



ся как «бесцветные» («белые») объекты. Антибарионы также «бесцветны». Если для бариона в качестве основных выбираются цвета: красный, желтый и синий, то для антибариона основными цветами будут: фиолетовый (красный + синий), оранжевый (красный+желтый) и зеленый (синий+желтый). Мезоны также бесцветны, поскольку цвет антикварка оказывается всякий раз дополнительным (компенсирующим) по отношению к цвету кварка в данном мезоне. Дополнительными по отношению к красному, желтому, синему являются соответственно цвета: зеленый, фиолетовый, оранжевый. Так, например, синий+оранжевый= синий+ (красный+желтый) =белый.

Теория цветных кварков (ее называют квантовой хромодинамикой) объясняет, почему в природе не встречаются частицы, сконструированные из двух или четырех кварков и, в частности, отдельные (свободные) кварки. Эта теория утверждает, что наблюдаемые в природе адроны и антиадроны должны быть обязательно «бесцветными» («правило невылетания цвета»). Ясно, что из одного, двух или четырех кварков нельзя составить

бесцветной комбинации. Недаром экспериментальный поиск свободных кварков продолжается уже двадцать лет — и безрезультатно. Конечно, очень хотелось бы обнаружить свободные кварки. Без этого кварковая гипотеза может показаться скорее остроумным математическим приемом, чем физической реальностью. Академик Я. Б. Зельдович писал в 1965 г.: «Дилемма, перед которой стоит сейчас физика, может быть сформулирована так: либо выяснена только классификация и свойства симметрии известных частиц, либо эта симметрия является следствием действительного существования кварков, т. е. совершенно нового фундаментального типа материи, атомизма нового типа». Прошло около десяти лет — и физики пришли к единодушному мнению: кварковая гипотеза связана с существованием атомизма нового типа. Иными словами, к концу 70-х годов физики перестали сомневаться, что кварки внутри адронов реально существуют.

Что же убедило их в этом? Оказалось, что три кварка плюс три антикварка позволяют сконструировать все адроны и антиадроны, открытые до 1974 г. Лишних объектов такое конструирование не порождало: все формально созданные структуры были в конечном счете обнаружены на опыте. Кварковая модель позволила правильно рассчитать различные характеристики адронов, вероятности взаимопревращений и т. д. Реальность кварковой гипотезы окончательно подтвердило открытие нового типа частиц, получивших экзотическое название — «очарованные частицы».

В ноябре 1974 г. на ускорителе в Станфорде (США) была открыта новая частица массой около 6000 m и временем жизни порядка 10^{-20} с. Сегодня эта частица известна как джей-пси-мезон (J/ψ). Новый мезон «не укладывался» в разработанные теоретические схемы: он должен был бы иметь примерно в 1000 раз более короткое время жизни. Для описания кварковой структуры этого мезона пришлось ввести новый кварк — c-кварк и новую сохраняющуюся величину, получившую название «очарование». Подобно странности, очарование сохраняется в сильных и не сохраняется в слабых взаимодействиях. Закон сохранения очарования и объясняет относительно большое время жизни нового мезона.

С введением c-кварка общее число типов кварков стало равно четырем. Электрический заряд нового кварка равен $+{}^2/_3$. Этот кварк называют носителем очарования, подобно тому как s-кварк является носителем странности.

Кварковая структура J/ψ-мезона есть $c\tilde{c}$. В 1976 г. были открыты D^0-мезон (структура $c\tilde{u}$) и D^+-мезон (структура $c\tilde{d}$). В последующие годы были обнаружены новые очарованные

мезоны, а также очарованные барионы. Открытие очарованных частиц экспериментально подтвердило существование c-кварка. Поскольку сам c-кварк, его свойства органически связаны со свойствами кварков u, d, s, то тем самым получает экспериментальное обоснование кварковая модель в целом.

Надо отметить, что физики весьма обрадовались открытию четвертого кварка. Дело в том, что в течение ряда лет существовала гипотеза: в слабых взаимодействиях представителями адронов выступают кварки. Поясним эту мысль на следующем примере. Пусть рассматривается распад свободного нейтрона. Обычно реакцию распада записывают в виде: $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$. Согласно предложенной гипотезе, этот процесс надо трактовать как превращение одного из d-кварков, входящих в состав нейтрона, в u-кварк с одновременным рождением электрона и электронного антинейтрино:

$$d \longrightarrow u + e^- + \tilde{\nu}_e.$$

При этом разрешается противоречие между небольшим числом типов лептонов и огромным количеством адронов. Оказывается, что число лептонов надо сопоставлять не с числом адронов, а с числом кварков, из которых построены адроны. Из рассмотренной гипотезы следовало, что число типов лептонов должно точно равняться числу типов кварков (так называемая кварк-лептонная симметрия).

И вот, казалось бы, убедительное подтверждение этой симметрии: налицо четыре лептона (e^-, ν_e, μ^-, ν_μ) и четыре кварка (u, d, s, c). И тем не менее физики-теоретики не были удовлетворены. Для объяснения всей совокупности известных экспериментальных фактов требовалось наличие не менее шести лептонов и соответственно такого же количества кварков.

В 1975 г. происходит открытие нового лептона — он заряжен отрицательно, имеет массу около 3500 m и время жизни порядка 10^{-12} с. Его назвали «таоном» (τ^-). Если мюон может рассматриваться как «тяжелый электрон», то таон должен получить титул «сверхтяжелого электрона». Физики уверены, что существование таона почти достоверно указывает и на существование еще одного нейтрино — таонного нейтрино (ν_τ). А если это так, то теперь перед нами как раз шесть лептонов.

Где же пятый и шестой кварки? Эти кварки заранее «вычислили». Им дали названия: b-кварк (носитель новой сохраняющейся величины, названной «прелестью») и t-кварк (носитель новой сохраняющейся величины, названной «истиной»). Заряд b-кварка равен $-^1/_3$, а t-кварка $+^2/_3$. Начались экспериментальные поиски предсказанных кварков на сверхмощных ускорителях. Летом 1977 г. был открыт ипсилон-мезон массой

около 20 000 m. Его кварковая структура есть $b\tilde{b}$. В последние годы появились указания на существование других прелестных адронов, так что b-кварк может сегодня рассматриваться как реальность. Проводятся исследования по обнаружению адронов, содержащих в своей структуре t-кварк.

Схема из шести лептонов и шести кварков представляется сегодня физикам очень привлекательной. Она хорошо упорядочивает накопленные данные по элементарным частицам. Будущее покажет, является ли эта кварк-лептонная схема окончательной или число лептонов (кварков) будет продолжать расти.

Заканчивая беседу об элементарных частицах, сообщим, что Нобелевская премия по физике за 1980 г. была присуждена трем физикам — Саламу, Вайнбергу и Глэшоу. Они удостоились премии за создание единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий. Фундаментом этой теории является кварк-лептонная симметрия.

Один из известных физиков современности Пайс достаточно точно охарактеризовал сегодняшнее состояние физики элементарных частиц: «Это состояние не сильно отличается от того, которое наблюдаешь, сидя в концертном зале перед началом концерта. На сцене уже появились многие (но не все) музыканты. Они пробуют свои инструменты. Иногда можно услышать ряд интересных музыкальных пассажей; отовсюду раздаются импровизации, иногда слышны и неправильно взятые ноты. Над всем этим нависло чувство ожидания того момента, когда раздадутся первые звуки симфонии».

Какие новые открытия ждут нас завтра? Этого мы не знаем. Но мы уверены, что находимся на верном пути. Об этом говорит успешное преодоление кризиса физики элементарных частиц 50-х годов, триумф кварковой модели адронов, понимание и обоснование кварк-лептонной симметрии, создание общей теории электромагнитных и слабых взаимодействий.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора . . . 3
Короткое замыкание! . . . 5
Как был открыт электрон . . . 11
Дрейф электронов . . . 17
Понятие о зонной теории электропроводности . . . 33
Стремителен молнии бег... . . . 39
Четвертое состояние вещества . . . 47
Старое и новое об элементах и батареях . . . 55
Как Ом математически разрабатывал свой закон . . . 64
Десять опытов с переменным током . . . 74
Глядя на счетчик электрической энергии . . . 83
Как создавалась картина электромагнитного поля . . . 88
Волчок и магнит . . . 97
Свет и глаз . . . 105
Мир звуков и красок . . . 114
Девятый вал . . . 123
Консультация по теме «Волновые свойства света» . . . 126
Абсолютно черное Солнце . . . 138
Действительность, превосходящая фантазию . . . 144
Лазеры обрабатывают материалы . . . 153
Можно ли заморозить световую волну? . . . 158
$E = mc^2$ . . . 167
Что такое МэВ? . . . 174
Как был открыт нейтрон . . . 181
Пусть будет атом рабочим, а не солдатом! . . . 188
Краткая история физики элементарных частиц . . . 198

Михаил Иванович Блудов

БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ

Часть II

Зав. редакцией Н. В. Хрусталь
Редактор В. А. Обменина
Младший редактор Л. С. Дмитриева
Художник С. Ф. Лухин
Художественный редактор В. М. Прокофьев
Технический редактор В. Ф. Коскина
Корректоры Н. В. Красильникова, Н. С. Соболева

ИБ № 8378

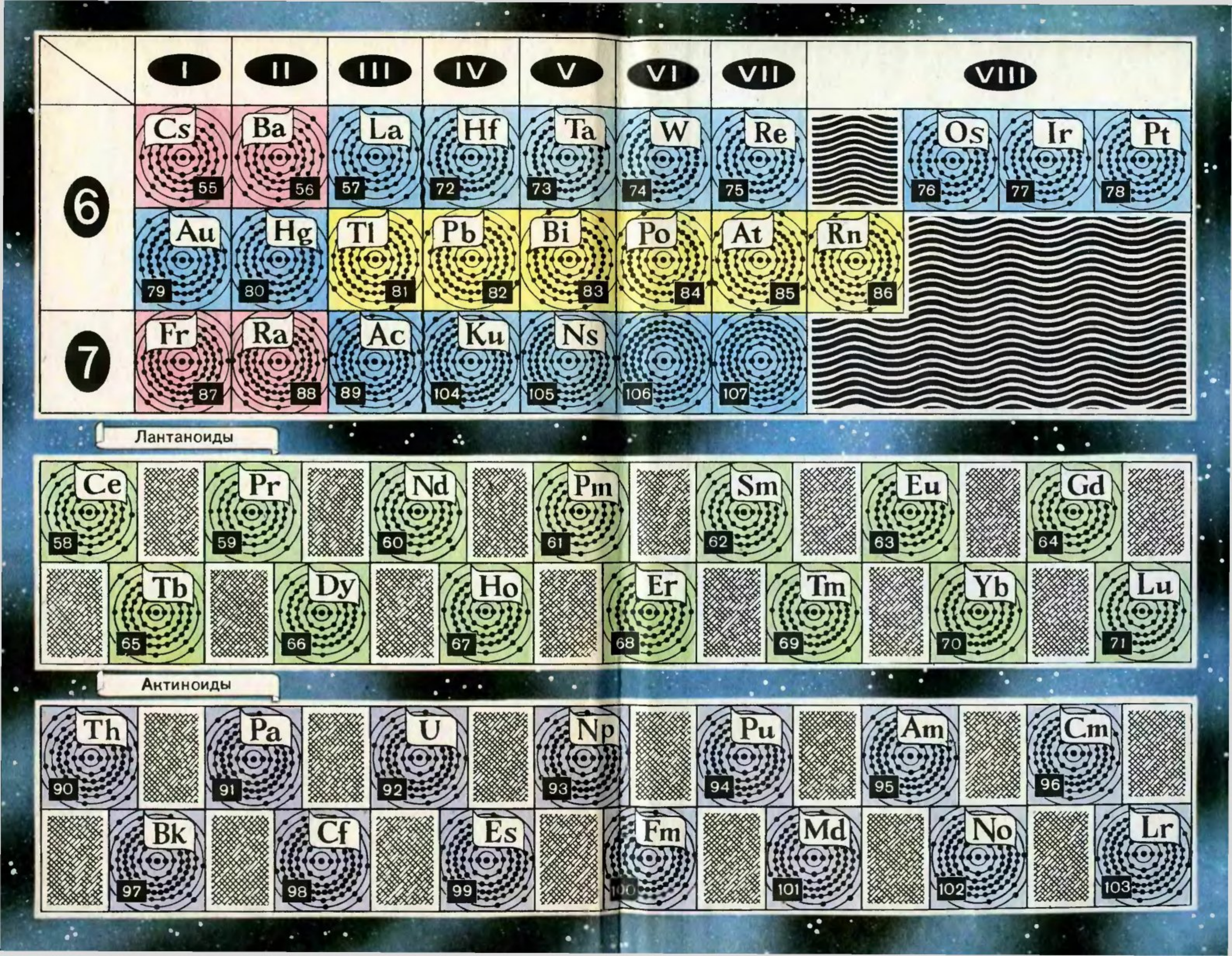
Сдано в набор 18.05.84. Подписано к печати 05.03.85. Формат $60\times90^{1}/_{16}$. Бум. офсетная № 2. Гарнит. об. новая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13+форзац 0,25. Усл. кр.-отт. 62,5. Уч.-изд. л. 14,12+форзац 0,45. Тираж 304 000 экз. Заказ 2820. Цена 70 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Калининский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. 170040, Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.

Периодическая система элементов Д.И. Менделеева

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1							H 1	He 2			
2	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10			
3	Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18			
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25		Fe 26	Co 27	Ni 28
	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36			
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43		Ru 44	Rh 45	Pd 46
	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54			



I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
6
Cs 55
Ba 56
La 57
Hf 72
Ta 73
W 74
Re 75
Os 76
Ir 77
Pt 78
Au 79
Hg 80
Tl 81
Pb 82
Bi 83
Po 84
At 85
Rn 86
7
Fr 87
Ra 88
Ac 89
Ku 104
Ns 105
106
107
Лантаноиды
Ce 58
Pr 59
Nd 60
Pm 61
Sm 62
Eu 63
Gd 64
Tb 65
Dy 66
Ho 67
Er 68
Tm 69
Yb 70
Lu 71
Актиноиды
Th 90
Pa 91
U 92
Np 93
Pu 94
Am 95
Cm 96
Bk 97
Cf 98
Es 99
Fm 100
Md 101
No 102
Lr 103